



Politechnika Opolska

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI

INSTYTUT: Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

Rozprawa doktorska

**Analiza wpływu temperatury oraz stopnia zawilgocenia  
i zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej na parametry  
modelu Cole-Cole wyznaczone przy wykorzystaniu metody  
spektroskopii częstotliwościowej FDS**

**Autor: mgr inż. Artur Adamowicz**

**Promotor: dr hab. inż. Stefan Wolny, prof. PO**

OPOLE 2015

*Składam gorące podziękowania promotorowi pracy,  
dr hab. inż. Stefanowi Wolnemu, profesor Politechniki Opolskiej,  
za opiekę naukową, życzliwość i poświęcony mi czas.*

## Spis treści

<b>1.</b>	<b>WPROWADZENIE .....</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>ZAŁOŻENIA METODYCZNE PRACY .....</b>	<b>4</b>
2.1	CEL I TEZY PRACY .....	4
2.2	ZAKRES OPRACOWANIA I PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA .....	4
<b>3.</b>	<b>OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ .....</b>	<b>6</b>
3.1	PAPIER CELULOZOWY .....	6
3.2	MINERALNY OLEJ IZOLACYJNY .....	10
3.3	PRZYGOTOWANIE IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ .....	12
3.4	MECHANIZMY STARZENIA PAPIERÓW CELULOZOWYCH .....	16
3.5	STARZENIE UKŁADU IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ .....	17
<b>4.</b>	<b>DIAGNOSTYKA IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ METODAMI POLARYZACYJNYMI .....</b>	<b>22</b>
4.1	KLASYFIKACJA METOD DIAGNOSTYCZNYCH STANU IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWYCH TRANSFORMATORÓW ENERGETYCZNYCH .....	22
4.2	METODA SPEKTROSKOPII CZĘSTOTLIWOŚCIOWEJ .....	26
<b>5.</b>	<b>ELEKTRYCZNY SCHEMAT ZASTĘPCZY IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ .....</b>	<b>32</b>
5.1	SCHEMAT SZEREGOWO-RÓWNOLEGLY WEDŁUG MODELU DEBYE’A .....	32
5.2	SCHEMAT SZEREGOWO-RÓWNOLEGLY WEDŁUG MODELU COLE-COLE .....	35
5.3	WYZNACZANIE PARAMETRÓW MODELU COLE-COLE W OPARCIU O DANE EKSPERYMENTALNE.....	37
5.4	METODA OBLICZENIA PARAMETRÓW SCHEMATU ZASTĘPCZEGO W OPARCIU O METODĘ APROKSYMACJI ZIARNISTEJ .....	39
5.5	SCHEMAT ZASTĘPCZY IZOLACJI GŁÓWNEJ TRANSFORMATORA WEDŁUG MODELU X-Y .....	42
<b>6.</b>	<b>STANOWISKO DO BADAŃ LABORATORYJNYCH PRÓBEK IZOLACJI CELULOZOWO- OLEJOWEJ Z WYKORZYSTANIEM METODY FDS .....</b>	<b>46</b>
6.1	UKŁAD POMIAROWY .....	46
6.2	PRZYGOTOWANIE PRÓBEK IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ .....	50
<b>7.</b>	<b>ANALIZA WPŁYWU TEMPERATURY NA PARAMETRY MODELU COLE-COLE PRÓBEK IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ.....</b>	<b>53</b>
7.1	CHARAKTERYSTYKI DISPERSYJNE WSPÓŁCZYNNIKA STRATNOŚCI $tg\delta$ I POJEMNOŚCI C .....	53
7.2	CHARAKTERYSTYKI PARAMETRÓW $\alpha$ ORAZ $\tau$ MODELU COLE-COLE .....	58

7.3	ANALIZA SYMULACYJNA CHARAKTERYSTYK NAPIĘCIA POWROTNEGO Z WYKORZYSTANIEM SCHEMATU SZEREGOWO-RÓWNOLEGŁEGO COLE-COLE .....	64
7.4	PODSUMOWANIE WYNIKÓW EKSPERYMENTALNYCH I SYMULACYJNYCH .....	69
<b>8.</b>	<b>ANALIZA WPLYWU ZAWILGOCENIA NA PARAMETRY MODELU COLE-COLE PRÓBEK IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ.....</b>	<b>71</b>
8.1	CHARAKTERYSTYKI DYSPERSYJNE WSPÓŁCZYNNIKA STRATNOŚCI $\text{tg}\delta$ I POJEMNOŚCI C .....	71
8.2	CHARAKTERYSTYKI PARAMETRÓW $\alpha$ ORAZ $\tau$ MODELU COLE-COLE .....	76
8.3	ANALIZA SYMULACYJNA CHARAKTERYSTYK NAPIĘCIA POWROTNEGO Z WYKORZYSTANIEM SCHEMATU SZEREGOWO-RÓWNOLEGŁEGO COLE-COLE .....	81
8.4	PODSUMOWANIE WYNIKÓW EKSPERYMENTALNYCH I SYMULACYJNYCH .....	84
<b>9.</b>	<b>ANALIZA WPLYWU ZESTARZENIA NA PARAMETRY MODELU COLE-COLE PRÓBEK IZOLACJI CELULOZOWO-OLEJOWEJ.....</b>	<b>85</b>
9.1	CHARAKTERYSTYKI DYSPERSYJNE WSPÓŁCZYNNIKA STRATNOŚCI $\text{tg}\delta$ I POJEMNOŚCI C .....	85
9.2	CHARAKTERYSTYKI PARAMETRÓW $\alpha$ ORAZ $\tau$ MODELU COLE-COLE .....	90
9.3	ANALIZA SYMULACYJNA CHARAKTERYSTYK NAPIĘCIA POWROTNEGO Z WYKORZYSTANIEM SCHEMATU SZEREGOWO-RÓWNOLEGŁEGO COLE-COLE.....	95
9.4	PODSUMOWANIE WYNIKÓW EKSPERYMENTALNYCH I SYMULACYJNYCH .....	98
<b>10.</b>	<b>BADANIA POWTARZALNOŚCI I ODTWARZALNOŚCI WYNIKÓW POMIAROWYCH .....</b>	<b>100</b>
10.1	PARAMETRYCZNE I NIEPARAMETRYCZNE TESTY ISTOTNOŚCI .....	100
10.2	PODSUMOWANIE BADAŃ STATYSTYCZNYCH .....	109
<b>11.</b>	<b>PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE .....</b>	<b>110</b>
<b>12.</b>	<b>PROBLEMY OTWARTE .....</b>	<b>118</b>
<b>13.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>119</b>

## WYKAZ OZNACZEŃ

Symbol	Opis	Jednostka
A	stała	-
C	pojemność elektryczna	F
$C_0$	pojemność geometryczna	F
$C_\infty$	pojemność elektryczna dla $f \rightarrow \infty$	F
DP	stopień polimeryzacji celulozy	-
$f_0$	częstotliwość początkowa	Hz
$f_1$	częstotliwość końcowa	Hz
$f_p$	częstotliwość wystąpienia bieguna impedancji $Z_{aa}$	Hz
$f_z$	częstotliwość wystąpienia zera impedancji $Z_{aa}$	Hz
$g(\tau)$	funkcja rozkładu czasów relaksacji	-
$i_d$	prąd depolaryzacji elektrycznej	A
p	poziom prawdopodobieństwa	-
R	rezystancja elektryczna	$\Omega$
s	operator impedancji charakterystycznej $Z_a$	-
t	czas	s
$t_c$	czas ładowania	s
$t_{r\_MAX}$	czas osiągnięcia wartości maksymalnej napięcia powrotnego	s
$t_z$	czas zwarcia	s
$U_c$	napięcie ładowania	V
$U_R$	napięcie powrotne	V
w	poziom zawilgocenia celulozy	%, ppm
X	skumulowana grubość barier	-
Y	skumulowana szerokość przekładek	-
$Z_a$	charakterystyczna impedancja dielektryczna	$\Omega$
$Z_{aa}$	charakterystyczna impedancja będąca wynikiem aproksymacji ziarnistej $Z_a$	$\Omega$
$\alpha$	współczynnik modelu Cole-Cole	-
$\chi$	podatność elektryczna dielektryka	-
$tg\delta$	współczynnik stratności dielektrycznej	-
$\epsilon$	przenikalność elektryczna dielektryka stratnego	-
$\epsilon_0$	przenikalność elektryczna próżni $8,85419 \cdot 10^{-12}$	F/m
$\epsilon_s$	przenikalność elektryczna dielektryka dla częstotliwości $f=0$	-
$\epsilon_\infty$	przenikalność elektryczna dielektryka dla częstotliwości $f=\infty$	-
$\gamma$	przewodność elektryczna (konduktywność)	S/m
$\tau$	stała czasowa relaksacji	s
$\omega_{pi}$	pulsacja wystąpienia bieguna impedancji $Z_{aa}$	rad/s
$\omega_{zi}$	pulsacja wystąpienia zera impedancji $Z_{aa}$	rad/s
$\Psi$	kąt stratności dielektryka	deg

# 1. Wprowadzenie

Bezpieczeństwo systemu energetycznego oraz niezawodność zasilania energią elektryczną w dużej mierze zależy od stanu technicznego transformatorów energetycznych. Poprawna diagnostyka ich stanu technicznego oraz rozwój inżynierii materiałowej jest nadal tematem wielu badań naukowych prowadzonych przez ośrodki badawcze na całym świecie [79, 106].

Mimo dużego postępu w dziedzinie diagnostyki urządzeń energetycznych, nadal ich najsłabszym elementem jest izolacja elektryczna. W przypadku awarii transformatorów najczęściej ulega zniszczeniu izolacja celulozowo-olejowa. Skutki takich awarii mogą powodować zagrożenie zanieczyszczenia środowiska jak również skutki ekonomiczne [20, 118]. Należy pamiętać, że transformatory energetyczne są jednym z podstawowych elementów majątku przedsiębiorstw energetycznych, a od ich poprawnej bezawaryjnej pracy w znacznym stopniu zależy sytuacja ekonomiczna [61, 77, 128]. Poruszana problematyka z punktu widzenia bezpieczeństwa systemu energetycznego jest bardzo ważnym elementem.

Opisane zagrożenia powodują konieczność prowadzenia dalszych badań pozwalających opracować nowe metody diagnostyczne transformatorów energetycznych. Rozwój diagnostyki umożliwi w sposób bezpieczny wydłużać czas eksploatacji urządzeń bez obaw o awarię [131].

Systemy elektroizolacyjne wykorzystujące połączenie celuloza-mineralny olej izolacyjny są nadal podstawowym układem izolacyjnym w transformatorach energetycznych. Układ ten występuje zarówno w starszych jednostkach transformatorowych jak również w nowo budowanych. Próby wprowadzenia nowocześniejszych materiałów elektroizolacyjnych (np. papiery i preszpary aramidowe) powodują duży wzrost kosztów produkcji transformatora [32, 75, 144, 151], natomiast próba zmiany oleju mineralnego na syntetyczny może powodować zagrożenie zanieczyszczenia środowiska [61, 86]. Zmianę systemu izolacji można zaobserwować głównie w nowych transformatorach suchych i specjalnych. Jednostki te stanowią nadal niewielki procent całej populacji transformatorów.

Stan izolacji celulozowo-olejowej jest ciągle podstawowym elementem określającym pozostały czas eksploatacji transformatora. Ze względu, że wiele pracujących jednostek transformatorowych zarówno w krajowym systemie energetycznym jak również w systemach innych państw, osiągnęło już połowę przewidzianego czasu eksploatacji, powstała potrzeba prawidłowego diagnozowania stanu tych jednostek [4, 20, 81].

Prowadzone przez lata badania nie doprowadziły do opracowania wiarygodnej, bezinwazyjnej metody oceny stopnia degradacji termicznej celulozowej izolacji transformatora [78]. Pomimo dużych osiągnięć w tej dziedzinie oraz wykorzystaniu metod polaryzacyjnych

i analizy zawartości związków furanu rozpuszczonych w oleju nie dają zadawalających wyników pozwalających w sposób jednoznaczny określić stopień zesterzenia celulozy.

Celem niniejszej pracy było przedstawienie metody, zaproponowanej przez autora, pozwalającej określić stopień degradacji termicznej izolacji celulozowo-olejowej transformatorów energetycznych.

W pracy przedstawiono analizę wpływu stopnia zawilgocenia, temperatury oraz zasterzenia na parametry izolacji celulozowo-olejowej. Obserwowane parametry uzyskano wykonując serię pomiarów wykorzystując jedną z częściej stosowanych metod w diagnostyce izolacji celulozowo-olejowej–spektroskopię częstotliwościową FDS. Kluczowym zadaniem było przede wszystkim opracowanie precyzyjnej metody pozwalającej określić stopień degradacji termicznej izolacji.

Rozdział 2 przedstawia tezy i plan pracy.

Rozdział 3 składa się z wprowadzenia w fizykochemiczne podstawy izolacji celulozowo-olejowej. Przedstawia także wymagania dotyczące przygotowania izolacji oraz wpływ starzenia na izolację.

Rozdział 4 zawiera przegląd metod polaryzacyjnych wykorzystywanych w diagnostyce transformatorów energetycznych. Szczegółowo również opisano metodę spektroskopii częstotliwościowej FDS.

Rozdział 5 przedstawia elektryczne schematy zastępcze izolacji według modelu Debye'a oraz Cole-Cole. Opisano sposób wyznaczenia parametrów Cole-Cole w oparciu o dane eksperymentalne. Przedstawiono również metodę aproksymacji ziarnistej w oparciu, o którą zostały wyznaczone parametry schematu zastępczego.

Rozdział 6 zawiera opis układu pomiarowego wykorzystanego w badaniach laboratoryjnych oraz szczegółową procedurę pomiarową. Opisana została konstrukcja przyrządów pomiarowych, sposób przygotowania próbek pomiarowych.

W rozdziale 7 przedstawiono wpływ temperatury na parametry izolacji celulozowo-olejowej. Poddano analizie: dyspersyjne charakterystyki współczynnika stratności dielektrycznej oraz pojemności elektrycznej próbek, charakterystyki parametrów  $\alpha$  i  $\tau$  modelu Cole-Cole oraz czasowe charakterystyki napięcia powrotnego jakie uzyskano na drodze symulacji.

Rozdział 8 opisuje wpływ zawilgocenia na parametry izolacji celulozowo-olejowej. Poddano analizie: dyspersyjne charakterystyki współczynnika stratności dielektrycznej oraz

pojemności elektrycznej próbek, charakterystyki parametrów  $\alpha$  i  $\tau$  modelu Cole-Cole oraz czasowe charakterystyki napięcia powrotnego jakie uzyskano na drodze symulacji.

W rozdziale 9 przedstawiono wpływ degradacji termicznej na parametry izolacji celulozowo-olejowej. Poddano analizie: dyspersyjne charakterystyki współczynnika stratności dielektrycznej oraz pojemności elektrycznej próbek, charakterystyki parametrów  $\alpha$  i  $\tau$  modelu Cole-Cole oraz czasowe charakterystyki napięcia powrotnego jakie uzyskano na drodze symulacji.

Rozdział 10 zawiera wyniki przeprowadzonych pomiarów pod kątem ich powtarzalności i odtwarzalności. Opisano metodę przeprowadzenia niezbędnych pomiarów statystycznych, a także zastosowaną metodologię badań. Przedstawiono wyniki potwierdzające odtwarzalność i powtarzalność pomiarową.

Rozdział 11 stanowi podsumowanie otrzymanych wyników oraz wnioski.

Rozdział 12 wskazuje na otwarte problemy związane z uzyskanymi wynikami oraz możliwe przyszłe kierunki badań.



## **2. Założenia metodyczne pracy**

### **2.1 Cel i teza pracy**

**Celem pracy jest opracowanie metody umożliwiającej określenie stopnia degradacji termicznej izolacji celulozowo-olejowej jaka stosowana jest w transformatorach energetycznych niezależnie od stopnia jej zawilgocenia oraz temperatury.**

Przeprowadzone badania wstępnie pozwoliły autorowi na postawienie następujących tez pracy:

- 1. Wykorzystując metodę FDS (Frequency Dielectric Spectroscopy) oraz odpowiedzi dielektrycznej Cole-Cole, możliwe jest szacowanie degradacji termicznej próbki izolacji celulozowo-olejowej niezależnie od stopnia jej zawilgocenia oraz temperatury.**
- 2. Wykorzystując metodę aproksymacji ziarnistej operatorowej impedancji charakterystycznej oraz model odpowiedzi dielektrycznej Cole-Cole, możliwe jest opracowanie bazy danych elektrycznych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej z uwzględnieniem stopnia ich zawilgocenia, zesterzenia oraz temperatury.**
- 3. Opracowane bazy danych mogą być wykorzystane do analizy porównawczej charakterystyk otrzymanych w diagnostyce olejowych transformatorów energetycznych wykonywanych metodami polaryzacyjnymi.**

Wykazanie prawdziwości przyjętych tez przeprowadzono na podstawie analizy teoretycznej oraz badań eksperymentalnych.

### **2.2 Zakres opracowania i przyjęte założenia**

Plan pracy obejmował m.in.:

1. Studia literaturowe w kierunku procesów zachodzących w czasie degradacji termicznej izolacji celulozowo-olejowej, stosowanych układów pomiarowych,
2. Przygotowanie układu pomiarowego,
3. Przygotowanie w programie PSpice układów schematów zastępczych badanych próbek izolacji,

4. Przygotowanie serii próbek izolacji celulozowo-olejowej o kontrolowanym stopniu zawilgocenia oraz degradacji termicznej,
5. Wykonanie pomiarów metodą spektroskopii częstotliwościowej, wyznaczenie parametrów modelu Cole-Cole w oparciu o dane eksperymentalne ,
6. Pomiary potwierdzające powtarzalność i odtwarzalność wyników pomiarowych,
7. Analizę danych, opracowanie wyników i sformułowanie wniosków końcowych.

### 3. Ogólna charakterystyka izolacji celulozowo-olejowej

Izolacja celulozowo-olejowa pomimo rozwoju inżynierii materiałowej jest nadal najczęstszym używanym układem izolacyjnym w urządzeniach energetycznych. Izolacja ta jest przykładem izolacji uwarstwionej. Papier lub preszpan z celulozy po nasyceniu mineralnym olejem izolacyjnym znacząco zwiększa wytrzymałość elektryczną tworząc w ten sposób system elektroizolacyjny [47, 77, 86]. Od sposobu wytworzenia a także od użytych składników zależy jakość izolacji. Pomimo dążenia do wykorzystywania materiałów syntetycznych jako systemy elektroizolacyjne to połączenie celulozy z mineralnym olejem izolacyjnym używa się w dalszym ciągu do produkcji transformatorów energetycznych.

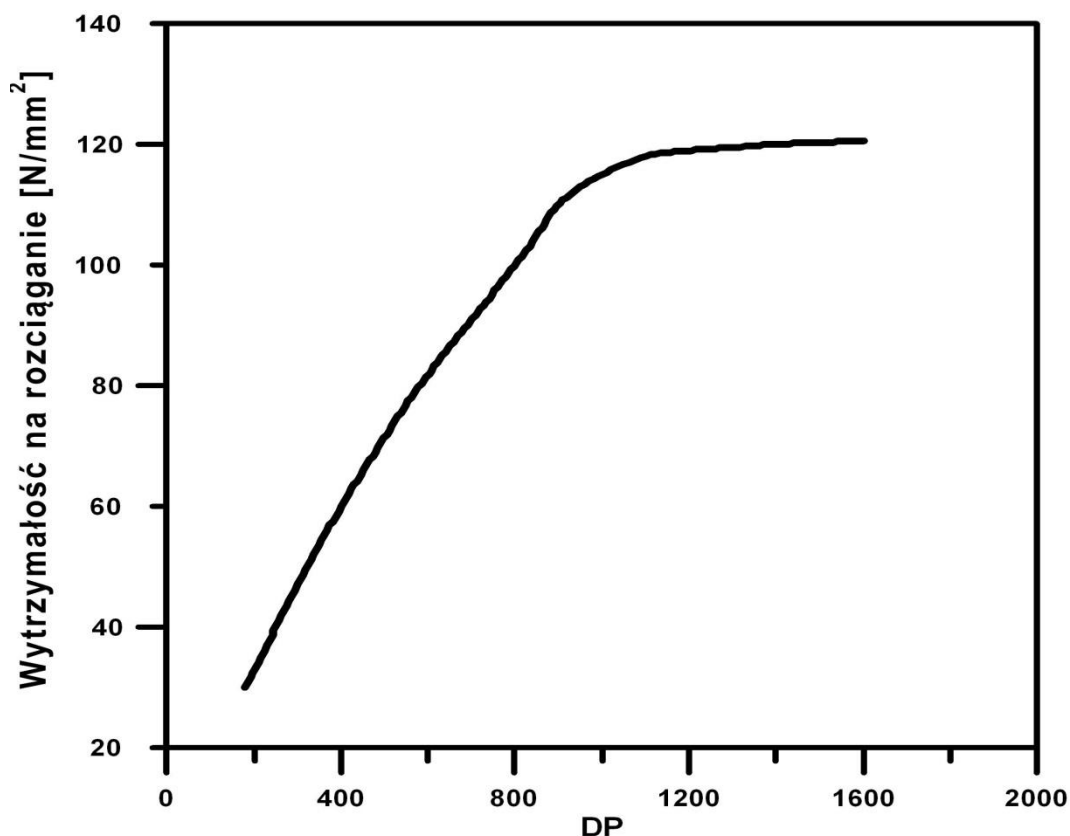
#### 3.1 Papier celulozowy

Papiery celulozowe używa się nadal jako materiały elektroizolacyjne w transformatorach energetycznych ze względu między innymi na ich dobre właściwości izolacyjne oraz mechaniczne [79, 86, 97]. Dzięki rozwojowi techniki ulepszono technologię produkcji powodując obniżenie kosztów wytworzenia a jednocześnie poprawiono jakość papieru. Argumentem przemawiającym również za używaniem papieru celulozowego jako materiału izolacyjnego jest także duża wiedza ekspercka jaką zdobyto podczas ich eksploatacji. Zgromadzone doświadczenie pozwala projektować złożone układy izolacyjne transformatorów, mogące pracować przez lata w różnych warunkach.

Włókna celulozy roślinnej są podstawowym budulcem papieru elektrotechnicznego i mogą stanowić do 96% składników papieru. Celuloza jest liniowym polisacharydem zbudowanym z grupy hydro D-glukopyranozy połączonych za pomocą wiązań wodorowych typu  $\beta$  [18, 84, 100]. Pojedyncze włókno celulozy to łańcuch zawierający bardzo wiele takich grup. W nowym papierze elektrotechnicznym liczba ogniw celulozy może wynosić nawet ok. 1400. Wiązania wodorowe działające niezależnie od wiązań chemicznych (kwalencyjnych), polegają na elektrostatycznym oddziaływaniu protonu wodoru z powłoką elektronową atomu i innego pierwiastka. Najsilniejsze wiązania wodorowe występują w przypadku połączeń z atomami o silnej elektroujemności, np. tlenu lub fluoru. Energia powstałego w ten sposób wiązania jest większa od wiązania Van der Waalsa, lecz o rząd mniejsza od wiązania kwalencyjnego [17, 119]. Opisane zjawisko powoduje, że atom wodoru wbudowany w związek wielocząstkowy może utworzyć wiązanie z atomem tlenu należącym do innego łańcucha. Sytuacja ta występuje w przypadku celulozy (rys. 3.1). Atom wodoru grupy hydroksylowej COOH jednego łańcucha



zależność mechanicznej wytrzymałości papieru elektrotechnicznego w zależności od wartości jego stopnia polimeryzacji. Widzimy, że wraz ze spadkiem wskaźnika DP zmniejsza się wytrzymałość papieru na zrywanie. Spadek stopnia wartości DP może być spowodowany np. przez starzenie się papieru celulozowego [22, 62, 78].



Rys. 3.3. Zależność pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie a stopniem polimeryzacji DP papieru elektrotechnicznego [92]

Elektrotechniczny papier celulozowy powinien mieć barwę naturalną (kolor żółtawy), powierzchnię bez prześwitów, dziur oraz nie powinien zawierać zanieczyszczeń. W papierach elektrotechnicznych włókna powinny być rozłożone równomiernie, co można skontrolować oglądając papier pod światło. Jeden z lepszych surowców do produkcji papieru celulozowego pochodzi z północnych lasów Finlandii lub Kanady, ponieważ tam przyrost drewna słoju w ciągu roku jest niewielki. Zapewnia to dłuższe i mocniejsze włókna (mają grubsze ścianki), co powoduje wzrost wytrzymałości mechanicznej produkowanego papieru.

Jakość papieru celulozowego wykorzystywanego w elektrotechnice określa się poprzez badanie jego właściwości elektrycznych, mechanicznych oraz fizycznych.

W nawiasach podano wartości parametrów w oparciu o dane z norm (norma PN-EN 60641) [95].

Parametry opisujące właściwości elektryczne:

- oporność na przebicie elektryczne w powietrzu ( $\geq 12$  kV/mm),
- oporność na przebicie elektryczne w oleju ( $\geq 40$  kV/mm),
- współczynnik stratności  $\text{tg}\delta$  (w  $30^\circ\text{C}$  ok. 0,02),
- przenikalność elektryczna papieru nieimpregnowanego (od 3 do 3,5),
- rezystywność,
- konduktywność wyciągu wodnego ( $\geq 100$   $\mu\text{S/cm}$ ),
- liczba cząstek przewodzących.

Parametry opisujące właściwości mechaniczne:

- opór przedarcia (ok. 1200 mN),
- wytrzymałość na zginanie i rozciąganie (ok. 11 kN/m),
- rozciągliwość wzdłużna ( $\geq 3\%$ ),
- wytrzymałość na składanie (podwójne zgięcie),
- rozciągliwość poprzeczna ( $\geq 4\%$ ),
- rozciągliwość wzdłużna ( $\leq 0,5\%$ ),
- współczynnik kurczenia poprzecznego ( $\leq 0,7\%$ ),
- współczynnik kurczenia poprzecznego ( $\leq 0,4\%$ ).

Parametry opisujące właściwości fizyczne:

- gramatura (ok. 01, kg/m),
- grubość (ok. 122,9  $\mu\text{m}$ ),
- gęstość (ok. 790  $\text{kg/m}^3$ ),
- zawilgocenie ( $\leq 6\%$ ),
- szybkość absorpcji wody i oleju ( $\geq 12\%$ ),
- przenikalność powietrza.

Parametry opisujące właściwości chemiczne:

- odczyn wyciągu wodnego (ok. 6,9),
- stopień polimeryzacji ( $\geq 1000$ ),
- liczba miedziowa ( $\geq 200$  mg/kg),

- zawartość chlorków w ekstrakcie wodnym,
- zawartość popiołu ( $\leq 01\%$ ).

### 3.2 Mineralny olej izolacyjny

Mineralne oleje izolacyjne są najczęściej używanymi cieczami dielektrycznymi. Są one frakcją ropy naftowej, powstałej w przypadku olejów transformatorowych w temperaturze 300 do 400 °C podczas procesu destylacji. Mineralny olej transformatorowy jest mieszaniną trzech grup węglowodorów: nasyconych węglowodorów naftenowych ( $C_nH_{2n}$ ), nasyconych węglowodorów parafinowych ( $C_nH_{n+1}$ ) i nienasyconych węglowodorów aromatycznych ( $C_nH_n$  i  $C_nH_{n-2}$ ) [29]. Rozróżnia się ropy w zależności, która z grup dominuje: naftenowe (60% węglowodory naftenowe, 25% węglowodory parafinowe, 15% węglowodory aromatyczne), parafinowe (25% węglowodory naftenowe, 60% węglowodory parafinowe, 15% węglowodory aromatyczne) oraz mieszane (40% węglowodory naftenowe, 40% węglowodory parafinowe, 20% węglowodory aromatyczne). Olej izolacyjny produkuje się ze wszystkich rodzajów ropy naftowej, ale najbardziej opłacalna jest destylacja ropy naftenowej. W przypadku wystąpienia dużej ilości węglowodorów parafinowych w oleju zwiększa się przede wszystkim jego temperatura krzepnięcia. Węglowodory te również w obecności pola elektrycznego wydzielają wodór i metan, który zwiększa możliwość wystąpienia wyładowań niezupełnych [14, 69, 85]. Z tego powodu producenci mineralnych olejów izolacyjnych ograniczają na etapie produkcji udział węglowodorów parafinowych do nie więcej niż 23%. Natomiast w zależności od rodzaju oleju udział węglowodorów aromatycznych mieści się w zakresie od 20% do 30%, ponieważ obecność tych węglowodorów wpływa dwójako na olej. Z jednej strony poprawiają właściwości gazowe oleju, z drugiej przyspieszają procesy utleniania [37, 65].

Z oleju transformatorowego podczas procesu rafinacji usuwane są niepożądane składniki (siarka, żywice, kwasy) oraz kontrolowany jest poziom udziału węglowodorów aromatycznych. Odparafinowanie, ekstrakcja oraz adsorpcja są podstawowymi procesami rafinacji fizycznej. Natomiast w celu usunięcia z oleju nadmiaru związków heterocyklicznych wykorzystuje się metodę rafinacji chemicznej. Najbardziej efektywną metodą rafinacji chemicznej jest hydrogenizacja, proces ten zachodzi w obecności katalizatorów oraz wodoru pod wysokim ciśnieniem lub w wysokiej temperaturze. Odpowiedni dobór parametrów (temperatury, ciśnienia, różnicy liczb oktanowych) powoduje odpowiednią redukcję ilości węglowodorów aromatycznych.

Minerale oleje transformatorowe można podzielić na:

- zawierające inhibitor utleniania,
- śladowo inhibitowane,
- zawierające inhibitor naturalny.

Jakość oleju izolacyjnego wykorzystywanego w elektrotechnice określa się poprzez badanie jego właściwości elektrycznych, fizycznych oraz chemicznych.

W nawiasach podano wartości parametrów w oparciu o dane z norm (norma PN-EN 60296) [94].

Parametry opisujące właściwości elektryczne:

- napięcie przebicia ( $\geq 40$  kV),
- współczynnik stratności  $\text{tg}\delta$  (w  $50^\circ\text{C} \leq 0,004$ ),
- przenikalność elektryczna względna (w  $20^\circ\text{C} \leq 2,2$ ),
- rezystywność (w  $90^\circ\text{C} \geq 10^{12} \Omega\text{m}$ ).

Grupę właściwości fizycznych opisują:

- lepkość kinetyczna (w  $40^\circ\text{C}$  ok.  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ),
- temperatura zapłonu ( $\geq 140^\circ\text{C}$ ),
- temperatura krzepnięcia ( $\geq -35^\circ\text{C}$ ),
- temperatura samozapłonu ( $\geq 300^\circ\text{C}$ ),
- gęstość (w  $20^\circ\text{C}$  ok.  $0,895 \text{ kg}/\text{cm}^3$ ),
- poziom zawilgocenia ( $\leq 0,03\%$ ),
- napięcie powierzchniowe (w  $20^\circ\text{C} \geq 40 \text{ mN}/\text{m}$ ),
- współczynnik dyfuzji molekularnej (w  $20^\circ\text{C} \leq 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ),
- klasyfikacja palności (O,  $\leq 300^\circ\text{C}$ ),
- właściwości stabilności gazowej w polu elektrycznym (max  $+5 \text{ mm}^3/\text{min}$ ),
- kolor (klarowny, wolny od osadów i zawiesin).

Grupę właściwości chemicznych opisują:

- liczba kwasowa ( $\leq 0,01 \text{ mgKOH}/\text{g}$ ),
- pH wyciągu wodnego (obojętny),
- zawartość 2-furfuralu ( $2\text{FAL} \leq 0,1 \text{ ppm}$ ),
- zawartość popiołu (ok.  $0,005\%$ ),



- zawartość osadów ( $\leq 0,8\%$ ),
- zawartość siarki ( $\leq 0,15\%$ ),
- całkowita zawartość kwasów ( $\leq 1,2$  mgKOH/g),
- zawartość PCB (nie wykrywalna ppm),
- zawartość PAC ( $\leq 3\%$ ).

### 3.3 Przygotowanie izolacji celulozowo-olejowej

Na jakość izolacji celulozowo-olejowej ma wpływ przede wszystkim proces, jakiemu została ona poddana na etapie przygotowania, czyli suszenie papieru celulozowego, przygotowanie oleju izolacyjnego oraz proces impregnacji [8, 18, 47].

Papier celulozowy wykazuje znaczną higroskopijność, a więc łatwo absorbuje np. z powietrza oraz uwalnia do oleju izolacyjnego cząstki wody, szczególnie przy braku równowagi hydrodynamicznej. Przyjmuje się, że przy normalnym ciśnieniu, temperaturze ok. 25°C oraz 50% wilgotności względnej papier celulozowy zawiera od 5% do 8% wody, co przy wykorzystaniu papieru celulozowego do transformatorów jest niedopuszczalne [30, 43].

Celuloza ulega łatwemu zawilgoceniu ze względu na dipolową strukturę cząstek  $H_2O$ , które mogą łatwo łączyć się z grupami  $-OH$  makrocząstki celulozy lub grupami  $-OOH$  cząstek powstałych w procesie starzenia papieru celulozowego. Proces osuszania izolacji celulozowej polega na doprowadzeniu do zerwania wiązań Van der Waalsa, które łączą cząstki wody z celulozą. Zerwania wiązań następują poprzez wzrost drgań cieplnych cząstek w podwyższonej temperaturze. Szybkość usuwania wody zgromadzonej na powierzchni papieru celulozowego odzwierciedla efektywność tego procesu. Można powiedzieć, że o szybkości dyfuzji wody do otoczenia decyduje różnica ciśnień pomiędzy wnętrzem suszonego materiału a otoczeniem. Współczynnik dyfuzji jest większy dla papierów celulozowych o większym zawilgoceniu co powoduje, że osuszenie celulozy zawilgoconej do poziomu np. 4,5 na 4% jest łatwiejsze do osiągnięcia aniżeli w przypadku papieru celulozowego zawilgoconego np. 1,5 na 1%. Minimalną zawartość wody w celulozie można uzyskać jedynie w próżni, przy czym wytworzona próżnia powinna być ok. 10 razy mniejsza od ciśnienia cząstkowego pary wodnej w materiale. Podczas przeprowadzenia procesów osuszania celulozy należy pamiętać, że wysoka temperatura przyspiesza zachodzące procesy starzeniowe celulozy

[110]. W związku z tym poziom próżni i temperaturę ustawia się tak aby osiągnąć optymalne warunki suszenia.

Duży poziom wilgoci w papierze celulozowym powoduje między innymi obniżenie wytrzymałości elektrycznej, wzrost współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$ , przyspiesza procesy starzeniowe, ale również może powodować efekt „bąbelkowania” [88, 98, 101]. W pracujących transformatorach energetycznych o dużym poziomie zawilgocenia izolacji można zaobserwować zjawisko „bąbelkowania”, czego konsekwencją mogą być wyładowania typu niepełnego. Wyładowania tego rodzaju zwiększają ryzyko wystąpienia wyładowania typu pełnego, które z kolei spowodują uszkodzenie katastrofalne całego transformatora. Dodatkowo w kadzi transformatora wzrasta ciśnienie, co może spowodować niekontrolowany przepływ oleju do konserwatora, co z kolei spowoduje zadziałanie przekaźnika gazowo-przepływowego Buchholtza i wyłączenie jednostki z ruchu.

Na rysunku 3.4 pokazano przykładowe uzwojenie transformatora olejowego wykonane przy użyciu papieru celulozowego.

Suszenie izolacji celulozowej podczas produkcji nowych transformatorów energetycznych jest procesem czasochłonnym i wymaga ciągłej kontroli. Obecnie najczęstszymi metodami suszenia papierów celulozowych są:

- suszenie gorącym powietrzem,
- suszenie elektryczne,
- suszenie próżniowe,
- suszenie gorącym powietrzem w połączeniu z suszeniem próżniowym,
- suszenie z tzw. fazą parową.

Pomimo nowoczesnych technologii suszenia izolacji celulozowej zawartość wody w celulozie zwłaszcza w grubszych elementach izolacyjnych może być rzędu 0,7%. Proces suszenia uznaje się za zakończony, jeżeli w temperaturze 60°C następujące parametry wynoszą: rezystancja izolacji  $10^9 \Omega < R < 10^{10} \Omega$ , współczynnik polaryzacji  $PI = R_{60}/R_{15} \geq 1,5$ , współczynnik stratności  $\text{tg}\delta_{50\text{HZ}} \leq 0,05$ .



Rys. 3.4. Uzwojenie transformatora olejowego wykonane na bazie celulozy [153]

Podobnie jak izolację celulozową, mineralny olej izolacyjny również należy odpowiednio przygotować. Głównymi zanieczyszczeniami mineralnego oleju izolacyjnego jest woda, gazy rozpuszczone oraz różnego pochodzenia cząstki stałe. Jednak najczęstszym zanieczyszczeniem olejów izolacyjnych jest woda, której wartość w nowym odpowiednio przechowywanym oleju sięga 20 ppm, a co jest niedopuszczalne przy wytwarzaniu izolacji celulozowo-olejowej. Impregnowanie osuszonej izolacji celulozowej zawilgoconym olejem mineralnym wówczas nie miałyby sensu [22, 47, 67].

Ryzyko wzrostu zawilgocenia oleju podczas przechowywania można ograniczyć stosując stalowe zbiorniki pokryte olejoodporną farbą oraz wyposażone w odpowietrzniki z wkładem zawierającym żel silikonowy. Kolejnym sposobem na ograniczenie zawilgocenia oleju jest przedmuchiwanie go suchym azotem w podwyższonej temperaturze (ok. 40°C). Wykorzystanie tej metody pozwala zredukować poziom zawilgocenia mineralnego oleju izolacyjnego do 10 ppm [30].

Pomimo odpowiednich warunków przechowywania oleju poziom zawilgocenia jest nadal za duży, dlatego stosuje się inne metody pozbywania się wody z oleju. Obecnie producenci transformatorów energetycznych najczęściej stosują metodę odgazowywania pod próżnią.

Podobnie jak w przypadku celulozy dobór parametrów tzn. ciśnienia próżni i temperatury jest bardzo ważny. Parametry te są przede wszystkim uzależnione od rodzaju oleju, szczególnie w przypadku olejów inhibitowanych. Inhibitory fenolowe mają często wyższe ciśnienie parowania aniżeli pozostałe związki węglowodorowe oleju, co może spowodować ich szybsze odparowanie. Wykorzystanie wysokiej próżni umożliwia usunięcie nie tylko wody z oleju, ale również gazów w nim rozpuszczonych. Kolejnym etapem jest przepuszczenie oleju przez filtr przeciwcząstkowy o średnicy porów nie większej niż 5  $\mu\text{m}$ . W ten sposób usuwane są zanieczyszczenia w postaci cząstek stałych, które w połączeniu z wodą mogą ograniczyć wytrzymałość elektryczną oleju. Oczyszczanie olejów eksploatowanych jest również możliwe, ale koszt stanowisk stacjonarnych oraz przewoźnych jest wysoki, ponieważ zainstalowane w urządzeniach pompy próżniowe są bardzo drogie. Jednak pomimo wysokich kosztów przedsiębiorstwa energetyczne decydują się na oczyszczenie mineralnego oleju izolacyjnego przedłużając w ten sposób czas eksploatacji transformatora [20, 35].

Zanieczyszczenia chemiczne, takie jak oleje silikonowe, detergenty, oleje roślinne oraz ciecz reagująca z metalami usuwa się filtrując olej przez ziemię okrzemkową. Zanieczyszczenia tego rodzaju mogą znaleźć się w oleju podczas napełniania transformatora oraz czynności wykonywanych przez obsługę.

Ostatnim etapem przygotowania izolacji celulozowo-olejowej transformatorów energetycznych jest impregnacja. Proces ten odbywa się z zastosowaniem wysokiej próżni. Gotowy transformator jest umieszczany w próżniowej komorze impregnacyjnej. Zazwyczaj proces suszenia próżniowego oraz impregnacji odbywa się na jednym stanowisku ze względu na wstępne nagrzanie warstw izolacji. Każdą transformatora zalewana jest mineralnym olejem izolacyjnym poprzez:

- dolny zawór kadzi (bezpośrednio z aparatury odgazowującej olej)
- górny zawór kadzi (zasysanie oleju za pomocą próżni z zewnętrznego zbiornika zawierającego odgazowany olej).

Zalewanie olejem kadzi transformatora jest skończone wówczas, gdy czujnik pływakowy zamknie zawór zalewowy. Pozostaje jeszcze uzupełnić poziom oleju i odpowietrzyć izolatory przepustowe.

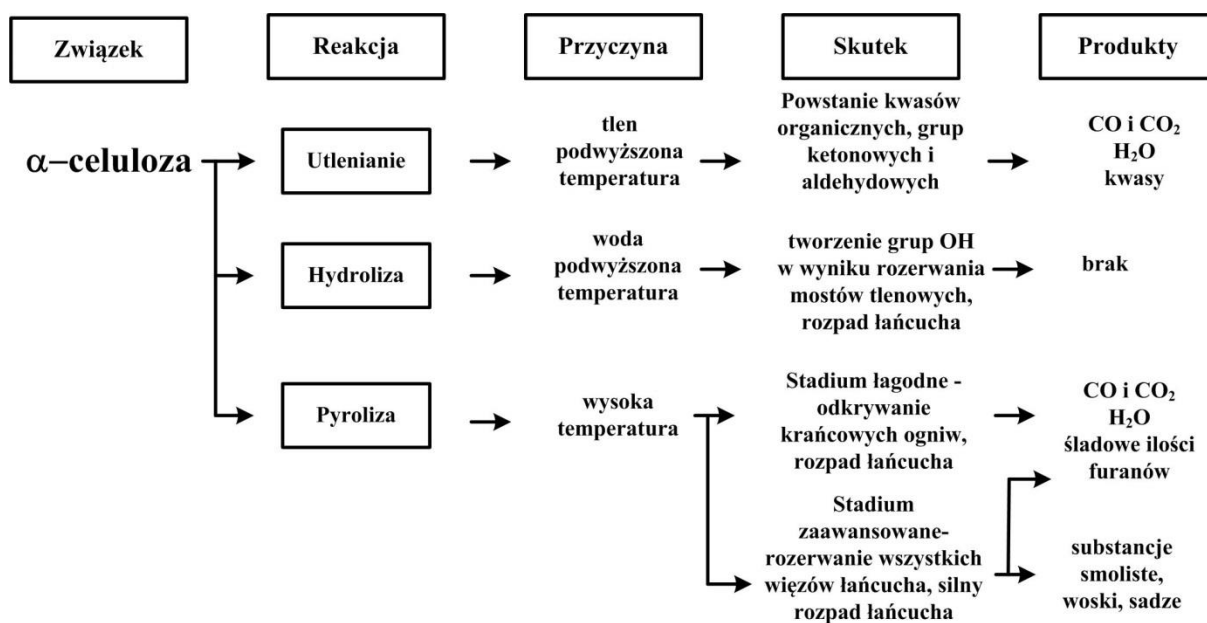
Stopień wysuszenia izolacji celulozowej, temperatura oleju oraz wysokość zastosowanej próżni decydują o tempie i jakości procesu impregnacji. W nowoczesnych rozwiązaniach izolacji celulozowo-olejowej konieczne jest stosowanie perforowania (otwory i ścieżki impregnacyjne) w celu ułatwienia przepływu oleju podczas impregnacji.

Suszenie oraz impregnacja izolacji transformatorów może być wykonywana wielokrotnie ze względu na prace remontowe lub poawaryjne. Należy, wówczas pamiętać o tym, że izolacja poddana wcześniej procesowi osuszania i impregnacji będzie podczas ponownego procesu impregnacji wymagała dłuższego czasu oraz innych parametrów [18, 67].

### 3.4 Mechanizmy starzenia papierów celulozowych

Starzenie elektrotechnicznego papieru celulozowego jest to złożony proces chemiczny powodujący zmniejszenie długości łańcuchów  $\alpha$ -celulozy (spadek wartości stopnia polimeryzacji DP celulozy), który jest połączony z generacją produktów starzenia. Podczas starzenia celulozy wytwarzana jest przede wszystkim woda, ale także wydzielane są gazy (głównie tlenki węgla CO i CO<sub>2</sub>), różnego typu substancje smoliste, woski, sadze oraz inne ciecze tj. niskomolekularne kwasy, śladowe ilości furanów [17, 35, 62].

Temperatura jest głównym powodem uszkodzenia łańcuchów  $\alpha$ -celulozy papieru elektrotechnicznego [66, 80, 133]. Skutkiem tego pogorszają się właściwości mechaniczne (wytrzymałość na zrywanie i przepuklenie) oraz chemiczne papieru (liczba kwasowa i miedziowa). Mechanizmy starzenia się papierów celulozowych można podzielić na trzy typy reakcji chemicznych: utlenianie, hydrolizę oraz pyrolizę (rys. 3.5). Podwyższona temperatura oraz obecność tlenu sprzyja tym reakcjom powodując ich inicjację oraz intensyfikację.



Rys. 3.5. Mechanizmy starzenia się elektrotechnicznych papierów celulozowych [141]

Proces utleniania celulozy może zachodzić w temperaturze około 60°C przy dostępie powietrza, ale pełny rozwój tej reakcji wymaga temperatury 125°C. Następuje wówczas utlenianie grup hydroksylowych  $\alpha$ -celulozy, jednak na tym etapie nie dochodzi jeszcze do rozerwania łańcuchów makrocząstek celulozy. Duża reakcja utleniania tworzy niskomolekularne, rozpuszczalne w wodzie kwasy, które działają katalizująco na proces degradacji termicznej łańcuchów celulozy.

Reakcja hydrolizy jest wywołana działaniem jednoczesnym podwyższonej temperatury oraz wody. Następuje wówczas rozerwanie mostków tlenowych łańcuchów, czego efektem jest zmniejszenie liczby ich ogniw i przyłączanie grup hydroksylowych. Proces hydrolizy przebiega powolnie nie wpływając bezpośrednio na właściwości mechaniczne i elektryczne papieru. Sytuacja ta zmienia się w przypadku hermetycznie zamkniętych kadzi olejowych transformatorów energetycznych, ponieważ w czasie hydrolizy tworząca się wilgoć nie może być bezpośrednio odprowadzona. Doprowadza to do wzrostu zawilgocenia izolacji celulozowo-olejowej w trakcie eksploatacji jednostki, co prowadzi do pogorszenia właściwości mechanicznych i elektrycznych papieru oraz może powodować przyspieszenie procesów starzeniowych.

Inicjacja procesu pyrolizy papieru celulozowego wymaga temperatury 200°C i jest bezpośrednim starzeniem termicznym. W czasie tej reakcji wytwarzane są różne związki chemiczne (np. 2-furfural, 5-hydroksy-metynol-furfural), ale podstawowym produktem pyrolitycznego rozpadu makrocząsteczek celulozy jest woda. W zaawansowanym stadium pyrolizy mogą pojawiać się różnego rodzaju substancje smoliste oraz woski. Ostatnim etapem pyrolizy jest karbonizacja celulozy i wydzielanie się sadzy [8, 27, 44].

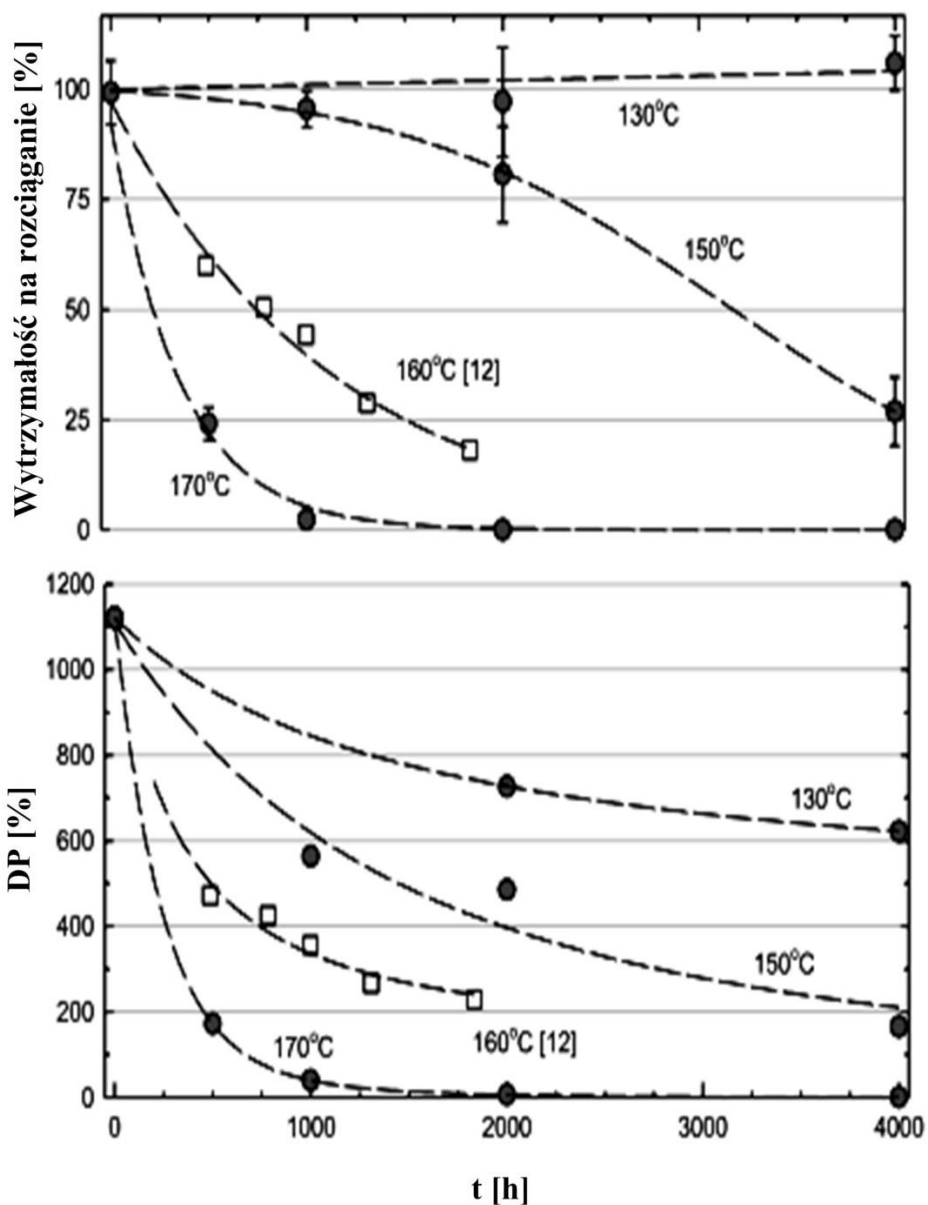
Ocenę stopnia zatarzenia celulozy można podzielić na dwie grupy:

- zmiany właściwości mechanicznych (np. wytrzymałość na zrywanie lub przepuklenie),
- zmiany chemiczne (liczba miedziowa i kwasowa, stopień polimeryzacji).

### **3.5 Starzenie układu izolacji celulozowo-olejowej**

Izolacja celulozowo-olejowa w trakcie eksploatacji transformatora jest poddawana oddziaływaniu różnego typu naprężeniom, takim jak: elektryczne, cieplne oraz chemiczne [99, 110]. Na podstawie tego można wyszczególnić trzy podstawowe mechanizmy starzenia: cieplny, jonizacyjny oraz elektrochemiczny [149]. Stopniowa degradacja izolacji celulozowo-olejowej jest wynikiem wzajemnie skorelowanych reakcji chemicznych. Na proces starzenia izolacji mają również wpływ dodatkowe oddziaływania produktów starzenia wytworzonych

w oleju oraz w celulozie [80, 84]. Pogorszenie parametrów izolacji celulozowej takich jak: stopniowa depolimeryzacja, wzrost zanieczyszczeń, obniżenie wytrzymałości mechanicznej oraz elektrycznej mówi nam o zesterzeniu takiej izolacji [136]. Od warunków eksploatacji, dokładności procesu produkcyjnego, ale także rodzaju i właściwości użytych komponentów zależy prędkość zachodzących zmian w izolacji [8, 44, 58, 113]. Rysunek 3.6 przedstawia przykładową charakterystykę wpływu czasu oraz temperatury starzenia na wartość wytrzymałości na rozciąganie i stopień polimeryzacji impregnowanej olejem izolacyjnym celulozy.



Rys. 3.6. Zmiany wytrzymałości na rozciąganie oraz DP w funkcji czasu starzenia impregnowanego olejem papieru celulozowego [54].

Podwyższona temperatura eksploatowanych transformatorów sprzyja pogorszeniu się stanu izolacji celulozowo-olejowej (np. utlenianie, pyroliza celulozy, wydzielanie gazów w oleju), gdyż wyższa temperatura może aktywować wiele reakcji chemicznych [117, 150]. Montsiger w roku 1930, bazując na pomiarach eksperymentalnych układów izolacyjnych pracujących transformatorów energetycznych, sformułował prawo opisujące związki pomiędzy czasem eksploatacji a temperaturą pracy izolacji celulozowo-olejowej. Prawo to zakłada dwukrotne przyspieszenie tempa starzenia izolacji w przypadku wzrostu jej temperatury o 6÷10 K. Na podstawie tej zależności Arrheniusa, Büssig oraz Dakin sformułowali prawo wyrażające czas „życia technicznego” izolacji. Zależność tą otrzymali rozwiązując równania starzeniowe reakcji chemicznych. Wykorzystując charakterystyki materiałowe, których uwzględnienie w termokinetycznych równaniach reakcji chemicznych, pozwoliło uzyskać równania charakterystyk starzeniowych izolacji. Równanie opisujące szybkość starzenia przedstawia wzór:

$$\frac{d}{dt}(x_0 - x) = C(T) \cdot x \quad (3.1)$$

gdzie:  $t$  – czas dni,

$x_0$  – charakterystyka materiałowa dla  $t=0$  (wartość początkowa),

$x$  – charakterystyka materiałowa po etapie starzenia w czasie  $t$ ,

$C$  – stała tempa procesu starzenia [1/dzień],

$T$  – temperatura procesu starzenia [K].

Ponieważ  $x_0$  w równaniu (3.1) jest stałą, zależność można zredukować do postaci:

$$\frac{dx}{dt} = -C(T) \quad (3.2)$$

Dakin zmodyfikował powyższe równanie, wprowadzając ogólny rząd reakcji  $\alpha$ . Dla warunku początkowego  $x(t=0)=x_0$  otrzymujemy:

$$X(t) = \frac{x(t)}{x_0}, \quad \frac{dX}{dt} = -C(T) \cdot X^\alpha \quad (3.3)$$

gdzie:  $\alpha$  – rząd reakcji ( $\alpha \geq 0$ ).



Dla warunku brzegowego  $x(t=0)=1$  przy różnych wartościach  $\alpha$  opisują zależności:

$$\text{dla } \alpha=0 \quad X(t)=1-C(T) \cdot t \quad (3.4)$$

$$\text{dla } \alpha = 1 \quad X(t)=e^{-C(T) \cdot t} \quad (3.5)$$

$$\text{dla } \alpha > 1 \quad \left(\frac{1}{X(t)}\right)^{\alpha-1} = (\alpha - 1)C(T) \cdot t \quad (3.6)$$

Zależność Arrheniusa przedstawia powiązanie temperaturowe stałej tempa procesu starzenia  $C(T)$ :

$$C(T) = C_A e^{\frac{E}{R \cdot T}} \quad (3.7)$$

gdzie:  $C_A$  – stała [1/dzień],

$E$  – energia aktywacji [J/mol],

$R$  – stała gazowa [J/(mol·K)].

Empiryczną zależność na stałą tempa procesu starzenia można przedstawić wzorem:

$$C(T) = C_M e^{m \cdot T} \quad (3.8)$$

gdzie:  $T$  – temperatura [°C],

$C_M$  – stała [1/dzień],

$M$  – stała materiałowa (dla izolacji celulozowo-olejowej  $m=0,0865$  [1/°C]).

W praktyce jednak dla potrzeb szacunkowego obliczenia maksymalnego czasu eksploatacji izolacji celulozowo-olejowej w transformatorach energetycznych stosuje się empiryczne równanie Montsingera.

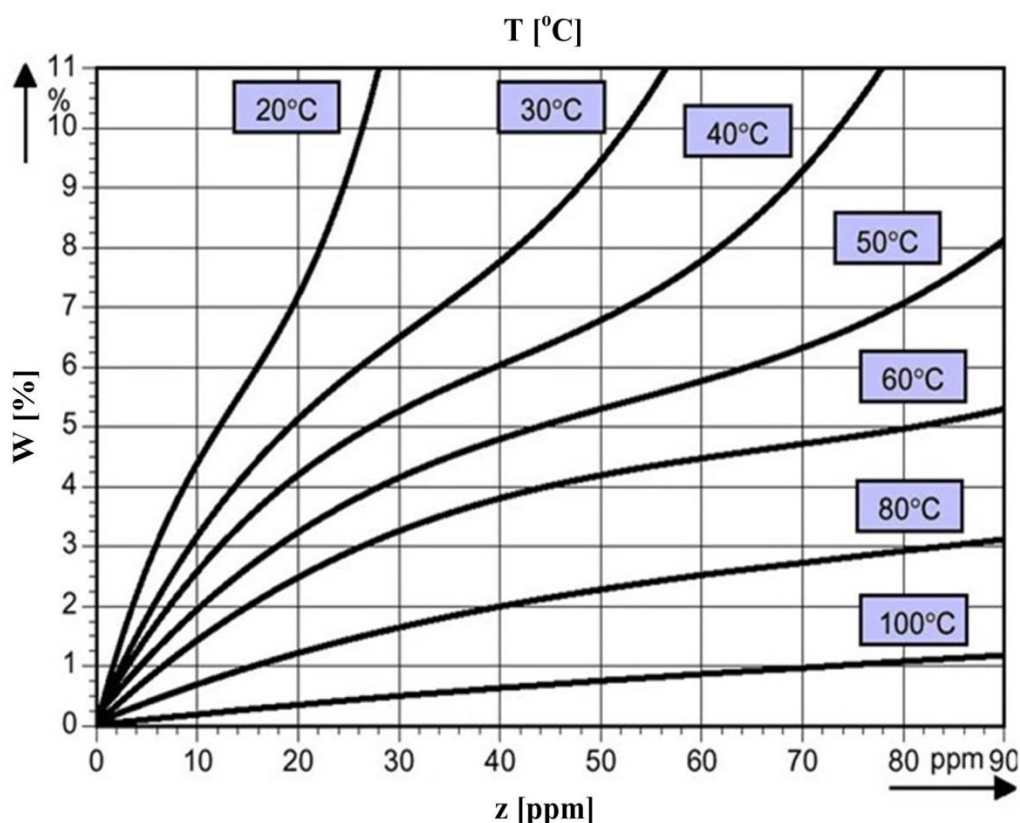
$$t = 7,154 \cdot 10^4 e^{-0,0865 \cdot T} \quad (3.9)$$

gdzie :  $t$  – maksymalny czas eksploatacji [lata].

W transformatorach energetycznych pracujących w warunkach rzeczywistych, podczas obliczania zestarzenia izolacji celulozowo-olejowej należy uwzględnić nierównomierny

rozkład temperatury w kadzi. Powoduje to, iż rozkład wskaźnika DP celulozy wzdłuż jak i w poprzek uzwojeń nie będzie jednakowy, a co za tym idzie stopień zawilgocenia celulozy będzie różny. Wynika to z charakterystyk równowagi hydrodynamicznej celuloza-papier (rys 3.7.) [89]. Ustalenie takiej równowagi może być czasochłonne i jest uzależnione od wielu czynników [68, 82, 90]. Do najważniejszych należy zaliczyć wielkość różnicy temperatur, gęstość i grubość papieru, stopień zesterzenia papieru i oleju oraz geometrię układu izolacyjnego. „Czas życia” izolacji zmniejsza się o połowę, jeżeli dwukrotnie wzrośnie jej zawilgocenie [89, 107], natomiast intensywność procesu starzenia jest proporcjonalna do stopnia zawilgocenia celulozy. Tempo starzenia izolacji zależy również od zawartości tlenu rozpuszczonego w oleju. Przy dużej jego koncentracji procesy starzeniowe mogą przyspieszyć o 1,6 razy, ze względu na agresywne oddziaływanie na celulozę produktów utleniania węglowodorów w oleju [41, 55, 125].

Na procesy starzeniowe izolacji celulozowo-olejowej ma znaczny wpływ woda oraz tlen [68]. W celu ograniczenia dostępu tych czynników kadzie transformatorów energetycznych hermetyzuje się.



Rys. 3.7. Charakterystyka równowagi hydrodynamicznej między papierem celulozowym a olejem izolacyjnym [89, 90].

## **4. Diagnostyka izolacji celulozowo-olejowej metodami polaryzacyjnymi**

Obecnie, prawidłowa eksploatacja transformatorów energetycznych oparta jest na rzetelnej ocenie stanu technicznego transformatora zwłaszcza, że większość pracujących jednostek transformatorowych tak w Polskich przedsiębiorstwach energetycznych jak i w innych państwach przekroczyło już połowę swego życia technicznego. Czynnikiem decydującym o bezpieczeństwie i opłacalności dalszej eksploatacji takich transformatorów jest stan izolacji celulozowo-olejowej, który określa tzw. pozostały „czas życia” technicznego, zakładając podobne warunki pracy jednostki. Nowoczesne metody diagnozowania stanu izolacji pozwalają przedsiębiorstwom energetycznym bezpiecznie wydłużyć czas eksploatacji transformatorów energetycznych przy akceptowalnie niskim ryzyku wystąpienia awarii [7, 65, 81, 116].

### **4.1 Klasyfikacja metod diagnostycznych stanu izolacji celulozowo-olejowych transformatorów energetycznych**

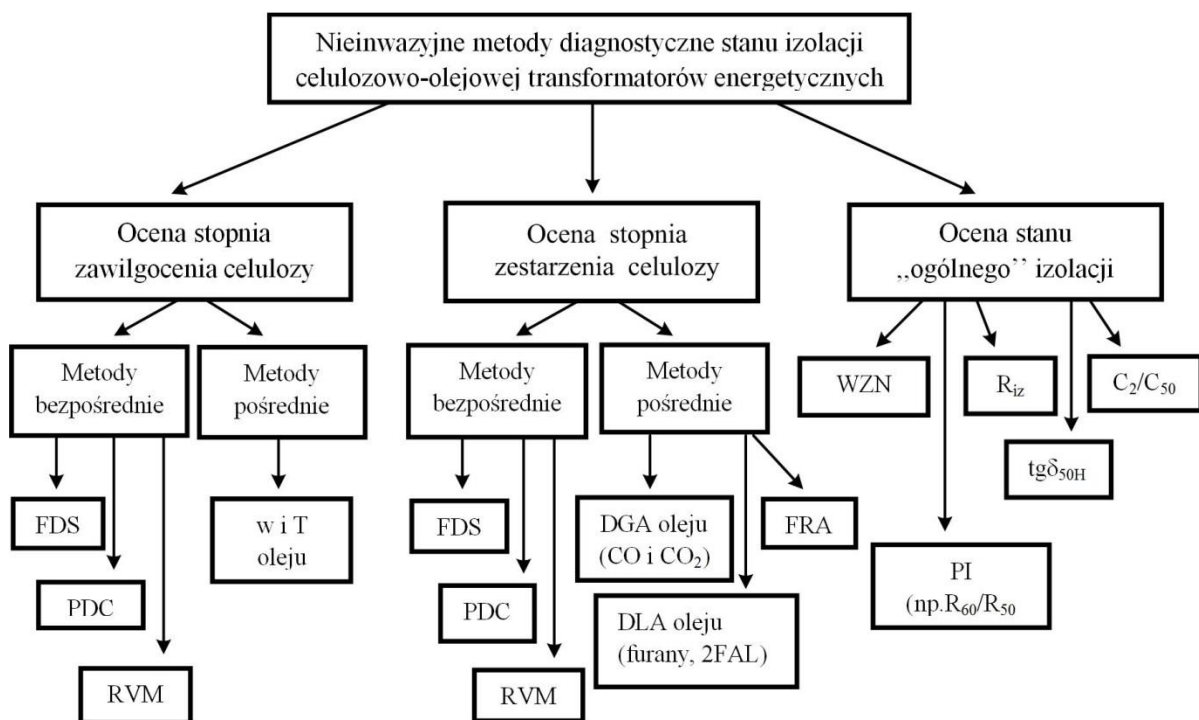
Metody diagnostyczne pozwalają wykryć szereg zjawisk powodujących niekorzystne zmiany stanu izolacji, których dalszy rozwój może doprowadzić do awarii transformatora pomimo jego normalnej eksploatacji. W rzeczywistości są to tzw. defekty wolno rozwijające się, których przyczyną mogą być [16, 25, 37, 63]:

- wady materiałowe i technologiczne,
- naprężenia elektryczne (przebiecia),
- naprężenia dynamiczne i cieplne (zwarcia, przeciążenia, drgania magnetostrykcyjne rdzenia),
- zmęczenia materiałowe połączeń (nieszczelności, rozluźnienia zestyków).

Wykonanie poprawnej bezinwazyjnej diagnostyki stanu izolacji celulozowo-olejowej transformatorów energetycznych wymaga stosowania specjalistycznej aparatury pomiarowej ale także odpowiedniego przygotowania teoretycznego i praktycznego [103]. Dodatkowo, aby potwierdzić poprawność wykonania diagnostyki, wykorzystuje się kilka metod pomiarowych oraz specjalistyczne programy komputerowe dedykowane do danej metody pomiarowej [115]. Dodatkowo przed przystąpieniem do pomiarów jednostki transformatorowej konieczne jest dokładne poznanie jej, tzn. sprawdzenie typu geometrii układu pomiarowego, historii eksploatacyjnej transformatora (np. ilość i zakres prac

remontowych, paramentów zwarć ruchowych oraz przepięć, czasu trwania przeciążeń). Ważnym elementem przygotowawczym do diagnostyki jest również poznanie stanu i rodzaju oleju izolacyjnego, ale także rozkładu temperatury wewnątrz kadzi transformatorowej. Analizując otrzymane wyniki przeprowadzonej diagnostyki, czasem zaleca się wykonanie dodatkowych badań, np. liczby kwasowej oleju oraz jego chromatografii gazowej [15, 19, 42].

Rysunek 4.1 przedstawia w sposób schematyczny klasyfikacją metod diagnostycznych. Ze względu na tematykę pracy wyszczególniono metody oceny stanu zawilgocenia i zesterzenia, badania określające ogólną kondycję izolacji celulozowo-olejowej. Pominięto natomiast badania stanu oleju oraz badania jakości papierów elektrotechnicznych (np. oznaczenie stopnia polimeryzacji celulozy, właściwości mechanicznych). Badania jakości papieru są metodami inwazyjnymi i przeprowadza się je zazwyczaj podczas planowych remontów, w celu potwierdzenia wyników wcześniejszych badań diagnostycznych lub ustalenia przyczyny zaistniałej awarii.



Rys. 4.1. Klasyfikacja nowoczesnych metod diagnostycznych stanu izolacji celulozowo-olejowej transformatorów energetycznych [141];

FDS – metoda spektroskopii częstotliwościowej, PDC – metoda analizy prądów polaryzacji i depolaryzacji, RVM – metoda napięcia powrotnego, W – stopień zawilgocenia, T – temperatura, DGA – metoda chromatografii gazowej oleju, DLA – metoda chromatografii cieczowej oleju, FRA – metoda odpowiedzi częstotliwościowej, WZN – metoda analizy poziomu wyładowań

niezpełnych,  $R_{iz}$  – rezystancja izolacji uzwojeń,  $PI$  – wskaźnik polaryzacji,  $R_{60}$  i  $R_{15}$  – rezystancje po upływie 60 i 15 sekund pomiaru,  $C_2/C_{50}$  – wskaźnik pojemnościowy, pojemność uzwojenia przy 2 i 50 Hz napięcia pomiarowego.

Jako metody bezpośrednie do oceny stopnia zawilgocenia izolacji celulozowo-olejowej wykorzystywane są trzy rodzaje metod diagnostycznych: FDS, PDC i RVM. Diagnostyka tymi metodami jest oparta na zaawansowanej analizie zjawiska polaryzacji elektrycznej dielektryków, w tym głównie tzw. odpowiedzi dielektryczne [4, 21, 38, 48]. W PDC oraz RVM analiza jest przeprowadzana w dziedzinie czasu, natomiast w FDS w dziedzinie częstotliwości [124]. Jednak w metodach tych, ze względu na długie czasy relaksacji makrocząsteczek celulozy oraz silną polarność wody ( $\epsilon' \approx 81$ ) wymagane jest stosowanie długich czasów pomiarowych (nawet do  $10^4$  s) oraz niskich częstotliwości (nawet od  $10^{-4}$  Hz) napięcia pomiarowego. Z tych powodów metody polaryzacyjne cechuje duża czasochłonność, a wykonanie pełnej diagnostyki jedną z metod może trwać nawet kilka godzin [112]. Znacznie to utrudnia badania terenowe, gdyż zmienność warunków atmosferycznych (np. zmiany wilgotności powietrza, nasłonecznienia oraz temperatury) mogą spowodować błędną diagnostykę [150]. Również podczas wykonywania diagnostyki przy pomocy metod polaryzacyjnych należy pamiętać o starannym ekranowaniu i izolowaniu przewodów pomiarowych ze względu na dużą ich podatność na zewnętrzne zakłócenia elektromagnetyczne. Jednak pomimo problemów pomiarowych, duża dokładność oznaczenia stopnia zawilgocenia izolacji celulozowo-olejowej rekompensuje powyższe problemy [7, 34, 48, 102].

Szacownie stopnia zawilgocenia izolacji celulozowo-olejowej jest możliwe również przy pomocy metody pośredniej. Do wyznaczenia stopnia zawilgocenia izolacji konieczna jest znajomość charakterystyk równowagi hydrodynamicznej celuloza-olej, stopnia zawilgocenia mineralnego oleju izolacyjnego oraz rozkładu temperatur wewnątrz transformatora. Pomimo prostoty tej metody oraz możliwości monitorowania on-line, metoda nie jest wiarygodna ze względu na znaczne błędy pomiarowe. Wpływa na nie przede wszystkim długi czas ustalenia równowagi hydrodynamicznej czy też brak dokładnej znajomości rozkładu temperatury w różnych miejscach układu izolującego [16, 38, 63, 74].

Określenie stopnia zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej transformatorów energetycznych jest znacznie mniej dokładne aniżeli stopnia zawilgocenia. Powodem tego są między innymi występujące trudności analizy otrzymanych wyników pomiarowych, nierównomierny rozkład zesterzenia celulozy wzdłuż jak i w poprzek uzwojeń transformatora

[127]. Również ośrodki badawcze na całym świecie skupiały uwagę głównie na precyzyjnym określeniu stopnia zawilgocenia izolacji a nie na zesterzeniu. Jednak, obecnie zwrócono uwagę na ten problem ponieważ jednostki transformatorowe są coraz starsze i wymagają kompleksowej diagnostyki.

Do wyznaczenia stopnia zesterzenia izolacji wykorzystuje się również metody polaryzacyjne (FDS, PDC, RVM) [23, 24, 33, 55, 108]. Niestety, nie opracowano całkowicie skutecznej metody analizy danych pozwalającej w sposób jednoznaczny i powtarzalny określić stopień zesterzenia celulozy. Ocena jest często rezultatem analizy porównawczej wyników diagnostyki polaryzacyjnymi metodami oraz badaniami innymi metodami np. chromatografii gazowej i cieczowej oleju izolacyjnego [11, 31, 53]. Również utrudnieniem wykorzystania metod polaryzacyjnych do oceny stopnia zesterzenia izolacji może być używany do tej pory zastępczy schemat układu izolacyjnego transformatora zbudowany w oparciu o model Debye'a [139, 141]. Model ten niestety nie opisuje precyzyjnie zmian w mechanizmach polaryzacji spowodowanymi procesami starzeniowymi zachodzącymi w diagnozowanej izolacji. Natomiast wykorzystanie w tym celu modelu Cole-Cole wydaje się być lepszym rozwiązaniem [140, 148]. Ponadto model ten umożliwia uzyskanie precyzyjnych przebiegów czasowych na podstawie otrzymanych danych z dziedziny częstotliwości, tzn. możliwość stosowania analizy diagnostyki metodą PDC lub RVM na podstawie danych otrzymanych z metody FDS [5, 23, 34, 59, 145].

Metodami pośrednimi oceny stopnia zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej transformatorów energetycznych są chromatografia gazowa i cieczowa oleju izolacyjnego oraz odpowiedź częstotliwościowa FRA. Analiza gazów rozpuszczonych w oleju (GDA) z oznaczeniem tlenków węgla (CO i CO<sub>2</sub>) służy do wykrywania i obserwowania tempa rozwoju zmian starzeniowych. Niestety współzależność koncentracji CO i CO<sub>2</sub> rozpuszczonych w oleju ze wskaźnikiem DP celulozy nie dały jednoznacznych i powtarzalnych wyników [10, 39, 48].

Zastosowanie chromatografii cieczowej oleju (DLA) z oznaczeniem koncentracji głównie 2-furfuralu (2FAL) umożliwiło uzyskanie dokładniejszej oceny stopnia zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej jednostek transformatorowych. Decyzją wyboru tego związku były następujące czynniki:

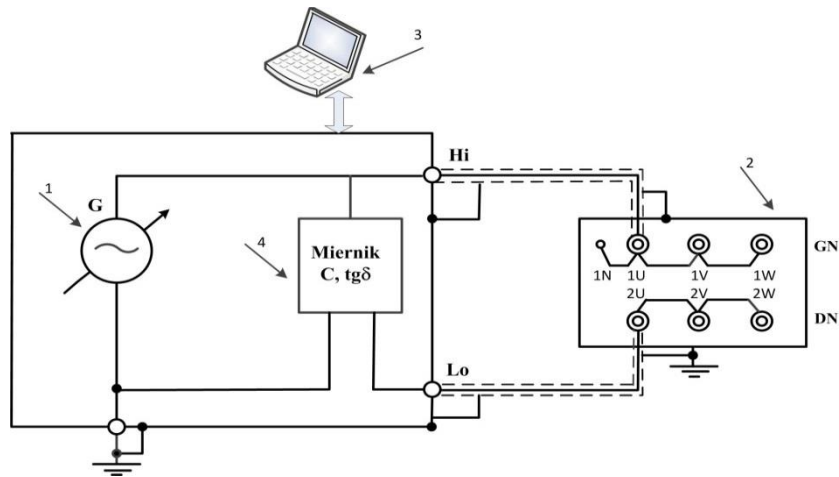
- duża korelacja koncentracji 2FAL ze wskaźnikiem DP celulozy,
- trwałość 2FAL w zakresie normalnej pracy transformatora (ok. 60°C),
- możliwość wykonywania badań na próbce oleju o niewielkiej objętości pobranej bezpośrednio z kadzi eksploatowanego transformatora.

Również metodą pośrednią wykorzystywaną do oceny stopnia zesterzenia izolacji w diagnostyce transformatorów energetycznych jest odpowiedź częstotliwościowa FRA. Polega ona na przyłożeniu do przepustu transformatora napięcia probierczego o zmieniającej się częstotliwości w zakresie od kilkudziesięciu Hz do kilku MHz i rejestrowaniu widma odpowiedzi uzwojenia na jego końcu neutralnym, bądź na przepuście drugiego uzwojenia tej samej fazy [39, 85]. Pozwala to wykrywać dyslokację i odkształcenia uzwojeń transformatora, których przyczyną może być osłabienie właściwości mechanicznych izolacji celulozowo-olejowej powstałych skutkiem zmian starzeniowych.

W ocenie ogólnej stanu izolacji celulozowo-olejowej transformatorów energetycznych najczęściej wykorzystuje się diagnostykę opartą na pomiarach i lokalizacji wyładowań niezupełnych występujących wewnątrz transformatora [14, 69].

#### **4.2 Metoda spektroskopii częstotliwościowej**

Metoda spektroskopii częstotliwościowej (FDS – Frequency Dielectric Spectroscopy) polega na analizie zmian pojemności i współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  (lub części rzeczywistej  $\epsilon'$  i urojonej  $\epsilon''$  zespolonej przenikalności elektrycznej) diagnozowanej izolacji w funkcji częstotliwości 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) [4, 11, 36, 93], natomiast górną wartość częstotliwości ustala się na poziomie  $10^2$  lub  $10^3$  Hz. W metodzie FDS wykorzystuje się regulowane wysokonapięciowe generatory niskich częstotliwości napięcia sinusoidalnego oraz układy rejestrujące chwilowe wartości napięcia i prądu. Z ich czasowych przebiegów algorytm miernika FDS wyznacza wartości impedancji, rezystancji, pojemności oraz ostatecznie  $\text{tg}\delta$  [104, 120, 151]. Do tego celu wykorzystuje się z reguły równoległy model zastępczy RC, który stosowany jest dla dielektryków wykazujących znaczne straty. Duże znaczenie ma również dobór odpowiedniego poziomu napięcia pomiarowego. Z jednej strony jego wartość ogranicza konieczność poprawnego mierzenia chwilowych wartości prądu, które w przypadku izolacji celulozowo-olejowej mogą być rzędu pojedynczych pA, z kolei z drugiej strony wartość napięcia nie może być zbyt duża, gdyż rośnie wtedy udział nieliniowych zjawisk polaryzacyjnych oraz składowej stałej [25, 40, 57, 126].



Rys. 4.2. Schemat układu połączeń stosowanych w diagnostyce transformatorów energetycznych metodą FDS [40];

1 – Generator napięcia o regulowanej częstotliwości, 2 – badany obiekt (transformator), 3- układ sterujący (często wyposażony w oprogramowanie do analizy otrzymywanych wyników badań), 4 – miernik C oraz  $\text{tg}\delta$

Rysunek 4.2 przedstawia wykorzystywany w diagnostyce metodą FDS schemat połączeń. Dokonując modyfikacji układu możliwe jest również dokonanie pomiarów między uzwojeniem a kadzią lub rdzeniem transformatora. W tym celu drugie uzwojenie powinno być zwarte oraz połączone z ekranem aparatury FDS i ziemią.

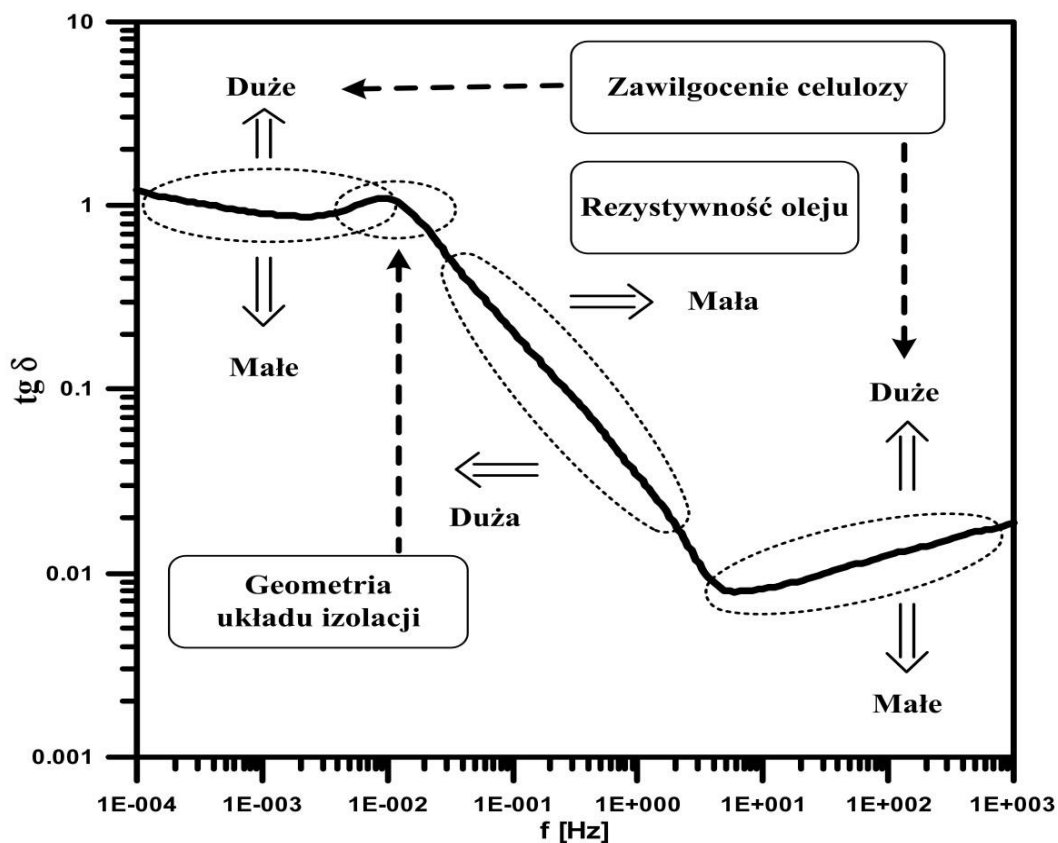
Wpływ na wyznaczane metodą FDS przebiegi, a zwłaszcza na  $\text{tg}\delta$  mają nieliniowe zjawiska polaryzacyjne, nagromadzone w izolacji ładunek elektrostatyczny oraz występowanie tzw. „efektu pamięci” powstałego na skutek wcześniejszych polaryzacji. Objawem tego może być niesinusoidalny przebieg rejestrowanego prądu lub udział składowej stałej. W celu ograniczenia wpływu powyższych czynników, zaleca się następującą procedurę pomiarową [13, 40, 57, 82]:

- zwieranie uzwojeń oraz łączenia ich z kadzią na minimum 1 godzinę przed pomiarem (uzyskujemy usunięcie ładunków elektrostatycznych oraz skasowanie „efektu pamięci”),
- rozpoczęcie procedury pomiarowej od częstotliwości wysokich do niskich, minimum 5 pomiarów na dekadę,
- wykonanie ekranowania przewodów pomiarowych (przewód napięciowy należy przyłączyć do uzwojeń GN, prądowy do uzwojeń DN),
- odpowiednie dobranie wartości napięcia pomiarowego.



Wykonując diagnostykę jednostki transformatorowej metodą FDS pod kątem oceny stopnia zawilgocenia izolacji widać, że wraz ze wzrostem ilości pochłoniętej wody rośnie wartość pojemności  $C$  oraz  $\text{tg}\delta$  celulozy [5, 41, 45]. Metoda ta jest również przydatna do wyznaczenia stopnia zesterzenia izolacji celulozowej [72, 111, 123].

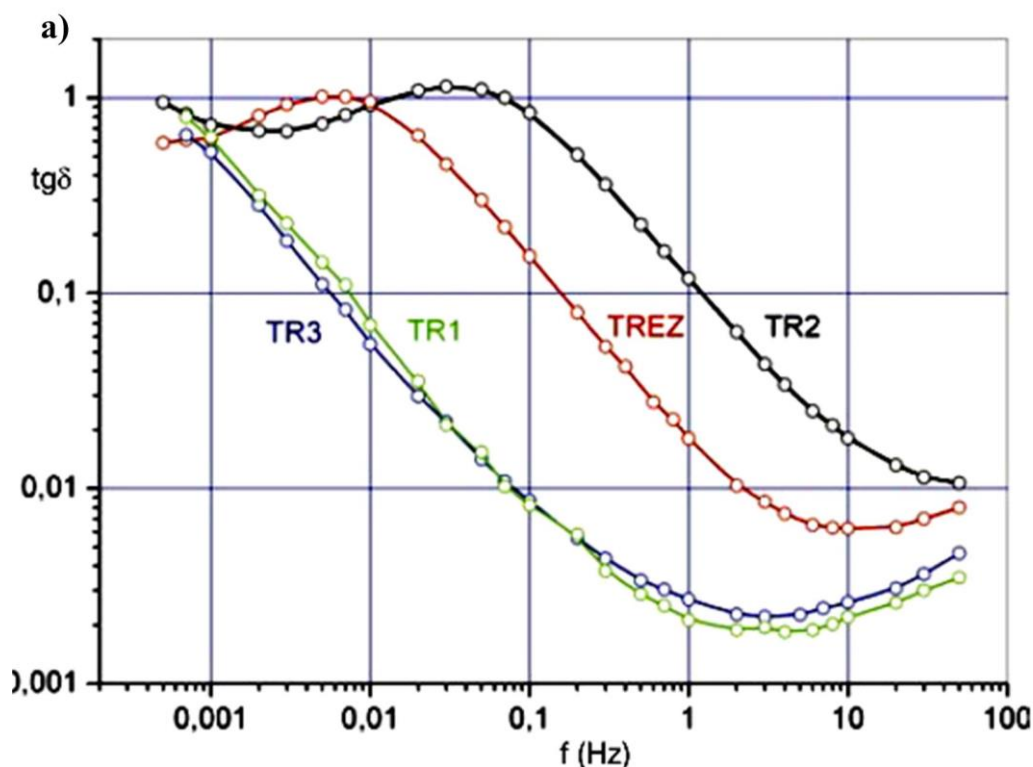
Wpływ jednoczesnego oddziaływania procesów przewodnictwa, relaksacji różnych fragmentów izolacji transformatora, stopnia zawilgocenia i zesterzenia oleju oraz celulozy, temperatury pomiaru oraz geometrii diagnozowanych uzwojeń powoduje znaczne różnice w rejestrowanych przebiegach [150]. Jednak w przypadku charakterystyki współczynnika stratności  $\text{tg}\delta(f)$  rys. 4.3 możliwe jest wyznaczenie przedziałów częstotliwości opisujących konkretne właściwości elementów celulozowo-olejowej izolacji transformatora.

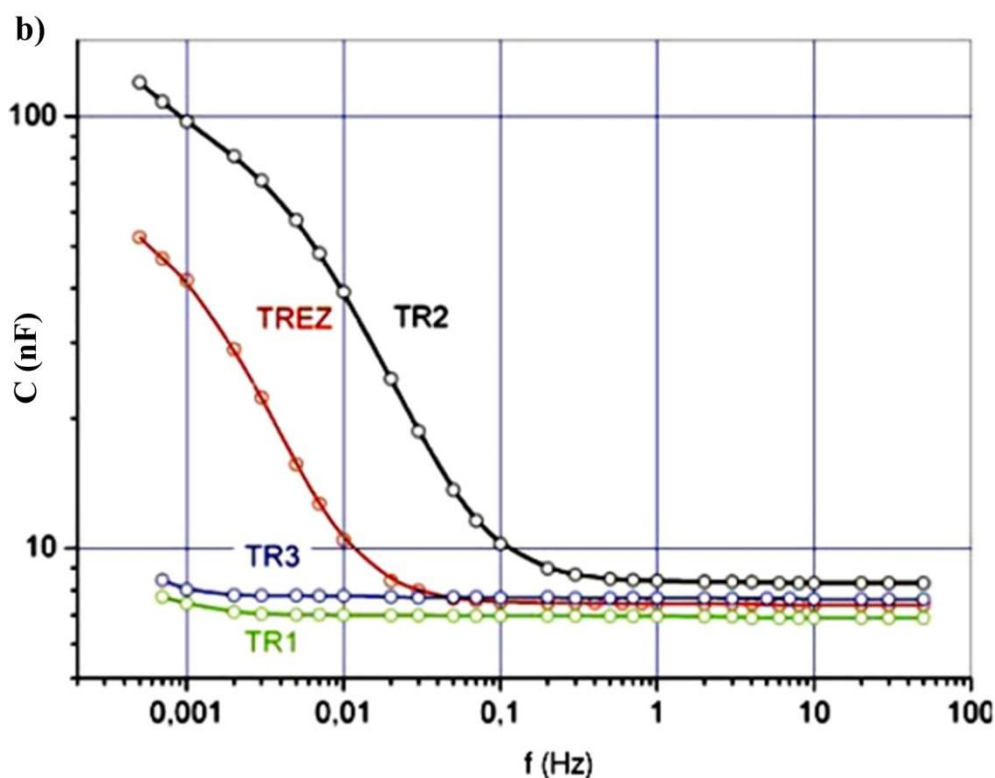


Rys. 4.3. Wpływ stanu izolacji celulozowo-olejowej na charakterystykę współczynnika stratności  $\text{tg}\delta(f)$  wyznaczoną metodą FDS [ 128, 130]

Opracowano również eksperckie programy ułatwiające przeprowadzenie analizy charakterystyk  $\text{tg}\delta(f)$ , uwzględniające wpływ temperatury pomiaru, geometrii układów izolujących transformatora energetycznego oraz zesterzenie celulozy [9, 28, 43, 109].

Prowadząc badania olejowych transformatorów energetycznych metodą FDS należy zawsze uwzględnić wpływ oddziaływania temperatury. Od jej wartości w znacznej mierze zależy poziom przewodnictwa oraz wartość stałych czasowych relaksacji poszczególnych elementów diagnozowanego układu izolacyjnego transformatora [129, 137]. Wzrost temperatury powoduje przesuwanie się charakterystyki  $\text{tg}\delta(f)$  w kierunku częstotliwości wyższych ze względu na rosnącą konduktywność oleju. Na rysunku 4.4 pokazano przykładowe charakterystyki pojemności  $C$  oraz  $\text{tg}\delta$  uzyskane z diagnostyki metodą FDS czterech eksploatowanych transformatorów blokowych. W przypadku badanych jednostek 10,5/115 kV o mocy 75 MVA (TR1, TR2, TR3) oraz 68 MVA (TREZ) zawilgocenie izolacji wynosiło odpowiednio 1,2%, 3,2%, 1,4% oraz 3,1%. Analizując charakterystyki zauważyć można, że wraz ze zwiększeniem się zawilgocenia izolacji charakterystyka  $\text{tg}\delta$  przesuwa się w stronę wyższych częstotliwości przy jednoczesnym dużym wzroście pojemności układu. Natomiast przesunięcie ekstremów  $\text{tg}\delta$  dla TR2 i TREZ, pomimo podobnego zawilgocenia wynika z dużej różnicy temperatury izolacji w czasie pomiaru. Temperatura górnej warstwy izolacji jednostki rezerwowej (TRZ) w chwili pomiaru wynosiła 5°C, podczas gdy w TR2 24°C [76].





Rys. 4.4 Wpływ stopnia zawilgocenia celulozy na wartość współczynnika strat dielektrycznych  $\text{tg}\delta$  (a) oraz pojemności  $C$  (b) izolacji celulozowo-olejowej [76]

TR1 – zawilgocenie 1,2%, TR2 – zawilgocenie 3,2%, TR3 – zawilgocenie 1,4%,  
 TREZ – zawilgocenie 3,1%

Wykonując diagnostykę transformatorów energetycznych metodą spektroskopii częstotliwościowej można wykorzystać miernik DIRANA firmy Omicron rys. 4.5. Miernik ten pozwala mierzyć między innymi współczynnik stratności  $\text{tg}\delta(f)$  oraz pojemność  $C(f)$  izolacji celulozowej. Opracowane oprogramowanie pozwala dokonywać analizy otrzymanych charakterystyk pod kątem stopnia zawilgocenia, zestarzenia oraz temperatury izolacji rys. 4.6.

Dane techniczne miernika DIRANA [26]:

- napięcie pomiarowe 200 V,
- prąd pomiaru 50 mA,
- dokładność pomiaru  $\text{tg}\delta$   $1\% \pm 3 \times 10^{-4}$
- dokładność pomiaru dla  $C$   $0,5\% \pm 1 \text{ pF}$



Rys. 4.5. Miernik DIRANA wraz z niezbędnym akcesoriami potrzebnymi do diagnostyki metodą FDS [26]



Rys. 4.6. Interfejs użytkownika podczas wykonywania pomiarów [87]

## 5. Elektryczny schemat zastępczy izolacji celulozowo-olejowej

Izolacja celulozowo-olejowa transformatorów energetycznych jest złożonym układem w sensie geometrycznym, ponieważ składa się z wielu elementów (np. izolacji zwojowej, przekładek, barier, kanałów olejowych) [49]. Dokonując analizy zachodzących zjawisk relaksacyjnych oraz przewodnictwa izolacji uzwojeń transformatora konieczna jest znajomość geometrii systemu izolacji oraz pojemności geometrycznej  $C_0$ . Programy komputerowe jakie stosuje się w diagnostyce transformatora metodami polaryzacyjnymi używają w swych algorytmach elektryczne schematy zastępcze układów izolacyjnych. W celu określenia oceny stopnia zawilgocenia lub zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej dąży się do uzyskania największej zgodności odpowiedzi prądowej lub napięciowej schematu zastępczego w porównaniu do rzeczywistej charakterystyki pomiarowej. Można to uzyskać używając zaawansowanych algorytmów obliczeniowych i wyznaczyć wielkości wszystkich elementów schematu zastępczego. W takim przypadku, ocena stopnia zawilgocenia lub zesterzenia celulozy dokonywana jest na podstawie wartości stałych czasowych relaksacji poszczególnych elementów diagnozowanego układu izolacji [51, 70, 111, 121]. Bardzo często stałe czasowe wyrażające poszczególne mechanizmy polaryzacji relaksacyjnych symulowane są jako szeregowe lub szeregowo-równoległe połączenia elementów RC. Liczbę mechanizmów relaksacyjnych jakie występują w diagnozowanej izolacji określa liczba gałęzi RC przyłączonych do schematu zastępczego [52, 72, 105].

### 5.1 Schemat szeregowo-równoległy według modelu Debye'a

Odpowiedź dielektryka, której nie można opisać idealnym modelem Debye'a często interpretuje się wykorzystując funkcję rozkładu czasów relaksacji. W związku z tym, odpowiedź całkowita jest sumą pojedynczych procesów relaksacji Debye'a [139, 141]. Wzór na funkcję odpowiedzi w dziedzinie częstotliwości można zapisać w postaci równania:

$$\chi(\omega) = \int_0^{\infty} \frac{g(\tau)}{1 + j\omega\tau} \quad (5.1)$$

gdzie:  $g(\tau)$  – funkcja rozkładów czasów relaksacji,

$\chi(\omega)$  – podatność elektryczna dielektryka,

$\omega$  – pulsacja,

$\tau$  – stała czasowa relaksacji.

Zastosowanie funkcji rozkładu  $g(\tau)$  pozwala opisać zjawiska polaryzacji materiałów o strukturze niejednorodnej, w których występują różne mechanizmy polaryzacji mające charakter relaksacyjny.

Zastępczy schemat elektryczny izolacji celulozowo-olejowej wykorzystujący funkcję rozkładu  $g(\tau)$  będącej sumą pojedynczych procesów relaksacji Debye'a przedstawiony jest na rysunku 5.1. W tym szeregowo-równoległym schemacie kolejne stałe czasowe relaksacji  $\tau_i$  wyrażają szeregowo gałęzie  $R_i C_i$ , połączone równolegle z rezystorem  $R_{iz}$  przedstawiającym rezystancję upływu oraz kondensator  $C_0$  określający elektryczną pojemność geometryczną dielektryka. Wzory 5.2, 5.3 oraz 5.4 opisują funkcję odpowiedzi układu dla odpowiednio długiego czasu ładowania  $t_c$  (jego wartość determinuje najdłuższa stała czasowa relaksacji [6, 53, 60]).

$$f(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{t_c}{\tau_i}} \quad (5.2)$$

$$A_i = \frac{1}{C_0} (1 - e^{-\frac{t_c}{\tau_i}}) \quad (5.3)$$

$$\tau_i = R_i C_i \quad (5.4)$$

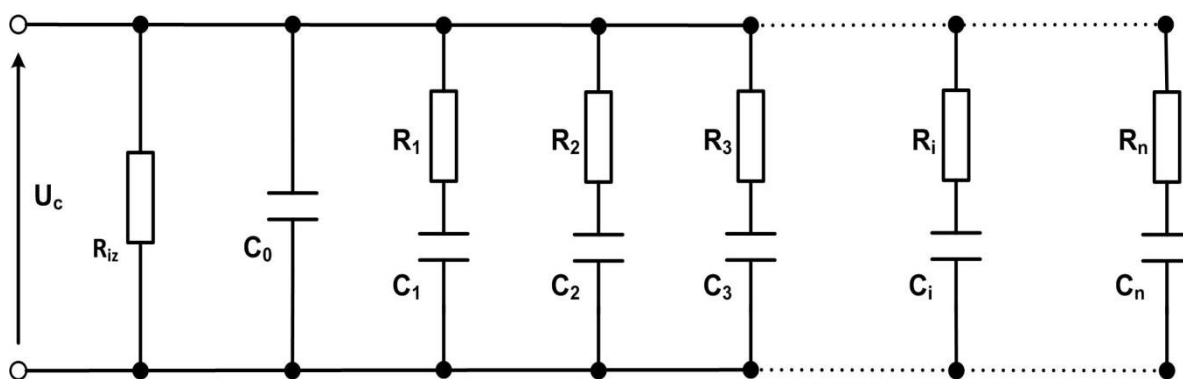
gdzie:  $A$  – stała,

$t_c$  – czas ładowania,

$C_0$  – pojemność geometryczna dielektryka,

$\tau_i$  – stała czasowa relaksacji,

$R_i, C_i$ , - rezystancja i pojemność gałęzi elektrycznego schematu zastępczego.



Rys. 5.1. Elektryczny szeregowo-równoległy schemat izolacji celulozowo-olejowej zbudowany w oparciu o funkcję rozkładu  $g(\tau)$  i model Debey'a

Najczęściej liczbę szeregowych gałęzi RC w szeregowo-równoległym schemacie zastępczym dla diagnozowanej izolacji celulozowo-olejowej ogranicza się do trzech. Jednocześnie przyjmując, że najdłuższy czas relaksacji określa właściwości samej celulozy tzn. (stopień zawilgocenia i zesterzenia), średni czas właściwości przypowierzchniowych warstw impregnowanego papieru, a natomiast najkrótszy czas relaksacji wyraża często poziom zawilgocenia oraz zesterzenia samego oleju [66, 71, 122].

Znajomość geometrii diagnozowanego układu izolacyjnego pozwala na wyznaczenie wartości elementu  $C_0$  schematu zastępczego na drodze obliczeń. Wartość elementu  $R_{iz}$  uzyskuje się najczęściej w wyniku pomiaru rezystancji izolacji. Stałe czasowe relaksacji  $\tau_i$ , to znaczy wartość rezystancji  $R_i$  oraz pojemność  $C_i$  można wyznaczyć na drodze wielokrotnej aproksymacji funkcji odpowiedzi  $f(t)$ . Funkcję tę uzyskuje się najczęściej z eksperymentalnych pomiarów prądu depolaryzacji zgodnie ze wzorem 5.5.

$$f(t_d) = \frac{i_d(t)}{U_c C_0} \quad (5.5)$$

gdzie:  $i_d$  – prąd depolaryzacji,

$U_c$  – napięcie ładowania,

$C_0$  – geometryczna pojemność izolacji uzwojenia.

## 5.2 Schemat szeregowo-równoległy według modelu Cole-Cole

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 [142, 146]. W takim przypadku wykres zespolonej przenikalności elektrycznej typu ( $\epsilon' - \epsilon''$ ) znajduje się wewnątrz okręgu opisanego równaniem 5.6, gdy  $\alpha=1$  rys. 5.2, a jego postać można zapisać za pomocą empirycznego równania Cole-Cole [2, 12, 46, 139].

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (5.6)$$

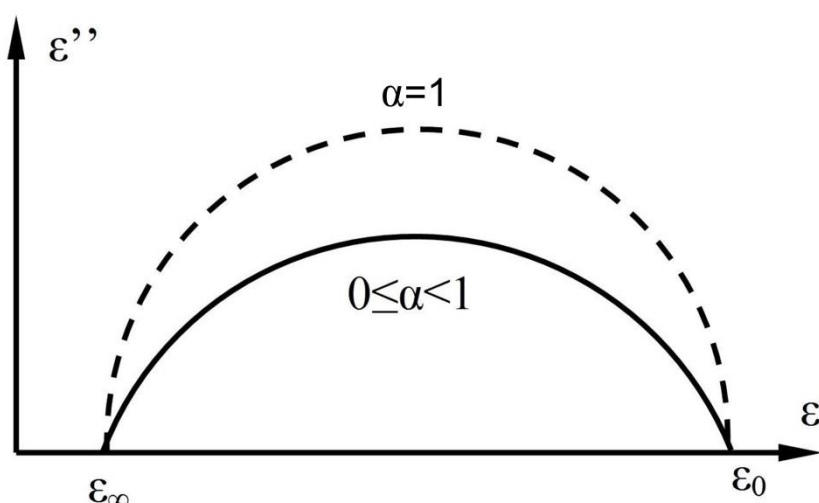
gdzie:  $\epsilon_0$  – przenikalność elektryczna,

$\epsilon_{\infty}$  – przenikalność elektryczna materiału dla częstotliwości  $f = \infty$ ,

$\omega$  – pulsacja,

$\tau$  – czas relaksacji,

$\alpha$  – współczynnik ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ).

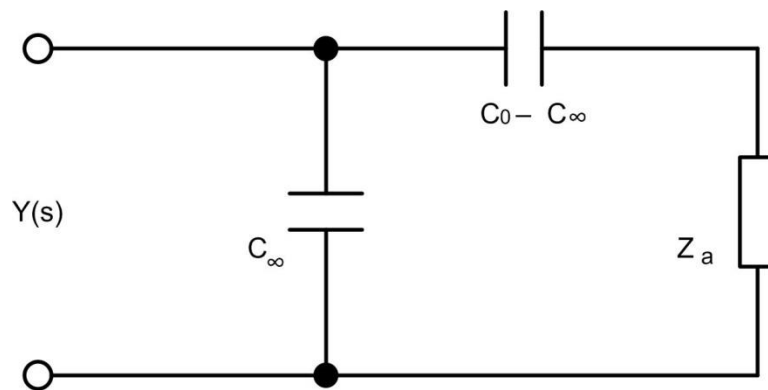


Rys. 5.2. Wykres Cole–Cole według równania (5.6)

Model Cole–Cole powstał w oparciu o cztery parametry ( $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_{\infty}$ ,  $\alpha$ ,  $\tau$ ), których analiza w postaci elektrycznego schematu zastępczego dielektryka przedstawia rys. 5.3. Relaksacyjne właściwości materiału przedstawia się w postaci impedancji



charakterystycznej  $Z_a$ , której wartość zależy od współczynnika  $\alpha$  oraz czasu relaksacji  $\tau$  [1, 12, 52, 93].



Rys. 5.3. Elektryczny schemat zastępczy dielektryka zbudowany w oparciu o model Cole-Cole

Wzór na impedancję charakterystyczną  $Z_a$  można wyznaczyć przez usunięcie pojemności  $C_\infty$  oraz  $(C_0 - C_\infty)$  z równania admitancji operatorowej  $Y(s)$ :

$$Y(s) = sC_\infty + \frac{(C_0 - C_\infty)s}{1 + (s\tau)^{1-\alpha}} = sC_\infty + \frac{1}{Z_1(s)} \quad (5.7)$$

$$Z_1(s) = \frac{(s\tau)^\alpha + s\tau}{(C_0 + C_\infty)(s\tau)^\alpha s} = \frac{1}{(C_0 - C_\infty)s} + Z_a(s) \quad (5.8)$$

$$Z_a(s) = \frac{\tau}{(C_0 + C_\infty)(s\tau)^\alpha} \quad (5.9)$$

gdzie:  $C_\infty$  - pojemność elektryczna dielektryka dla częstotliwości  $f \rightarrow \infty$

Operatorowa impedancja charakterystyczna  $Z_a(s)$  opisuje właściwości relaksacyjne dielektryka [130]. Ponieważ operator  $s$  jest przeważnie w potęgze niecałkowitej ( $0 \leq \alpha < 1$ ), wyznaczenie wartości elementów schematu zastępczego impedancji  $Z_a$ , możliwe jest jedynie na drodze aproksymacji [21, 46].

### 5.3 Wyznaczanie parametrów modelu Cole-Cole w oparciu o dane eksperymentalne

Wyznaczenie wzoru na impedancję charakterystyczną  $Z_a$  dla konkretnego dielektryka, jest możliwe wówczas gdy znamy wszystkie parametry modelu Cole-Cole ( $C_0$ ,  $C_\infty$ ,  $\tau$ ,  $\alpha$ ) [46, 142, 146]. W przypadku próbek izolacji celulozowo-olejowej pojemność geometryczną  $C_0$  najczęściej określa się za pomocą wzoru na pojemność płaskiego kondensatora próżniowego, natomiast jeśli obiektem badanym jest izolacja transformatora wartość  $C_0$  można określić za pomocą wzorów [6, 140, 143]:

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\log \frac{r_{GN}}{r_{DN}}} \quad (5.10)$$

$$C_0 = \frac{C_{iz}}{\epsilon_{iz}}, \quad \epsilon_{iz} = \frac{\epsilon_{przeszpan}\epsilon_{olej}}{\epsilon_{przeszpan}X + \epsilon_{olej}(1-X)}, \quad X = \frac{G_B}{G_K} \quad (5.11)$$

gdzie:  $h$  – wysokość uzwojeń,

$r_{GN}$  – zewnętrzny promień izolacji głównej,

$r_{DN}$  – wewnętrzny promień izolacji głównej,

$C_{iz}$  – pojemność badanej izolacji,

$\epsilon_{iz}$  – rzeczywista przenikalność elektryczna układu,

$G_B$  – grubość wszystkich barier,

$G_K$  – grubość kanału izolacyjnego.

Pojemność  $C_\infty$  najlepiej jest zmierzyć przy dużej częstotliwości napięcia pomiarowego, co oznacza w przypadku izolacji celulozowo-olejowej wartość większą od  $10^3$  Hz. Do wyznaczenia impedancji charakterystycznej  $Z_a$  pozostaje jeszcze prawidłowe wyznaczenie wartości stałej czasowej  $\tau$  oraz parametru  $\alpha$ . Parametry te wyznacza się w oparciu o dane z pomiarów eksperymentalnych badanej izolacji. W tym celu można wykorzystać metodę FDS. Wykonane pomiary pozwalają wyznaczyć charakterystykę Cole-Cole zespolonej przenikalności ( $\epsilon' - \epsilon''$ ) [1, 12, 143] na podstawie wzorów (5.12).

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0}, \quad \epsilon'' = \epsilon' \cdot tg\delta \quad (5.12)$$

Obliczone wartości zespolonej przenikalności ( $\varepsilon'$ ,  $\varepsilon''$ ) umożliwiają wyznaczenie stałej czasowej  $\tau$  oraz współczynnika  $\alpha$  w oparciu o charakterystykę z rysunku 5.4 oraz wzory:

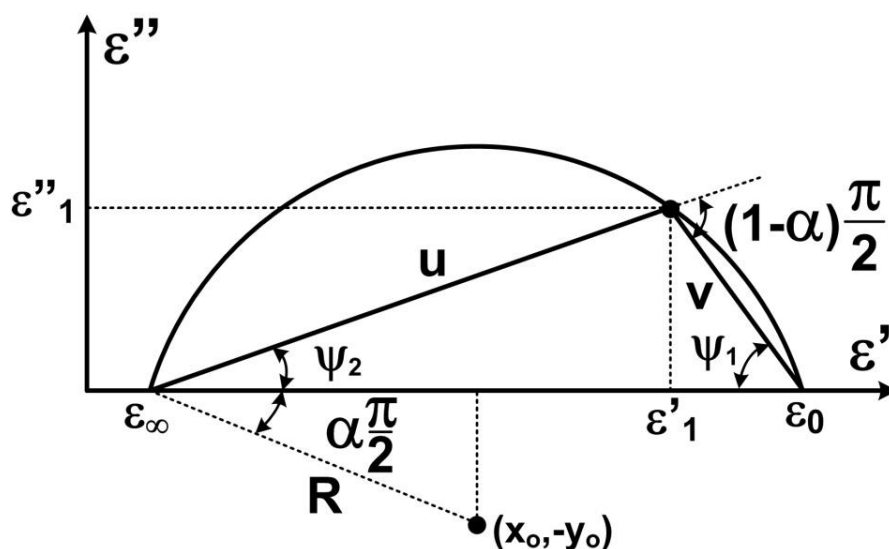
$$u = \sqrt{(\varepsilon'_1 - \varepsilon_n)^2 + \varepsilon''_1{}^2}, \quad v = \sqrt{(\varepsilon_s - \varepsilon'_1)^2 + \varepsilon''_1{}^2} \quad (5.13)$$

$$\left| \frac{u}{v} \right| = (\omega\tau)^{1-\alpha}, \quad \text{Arg}(v) - \text{Arg}(u) = (1-\alpha) \cdot \frac{\pi}{2} \quad (5.14)$$

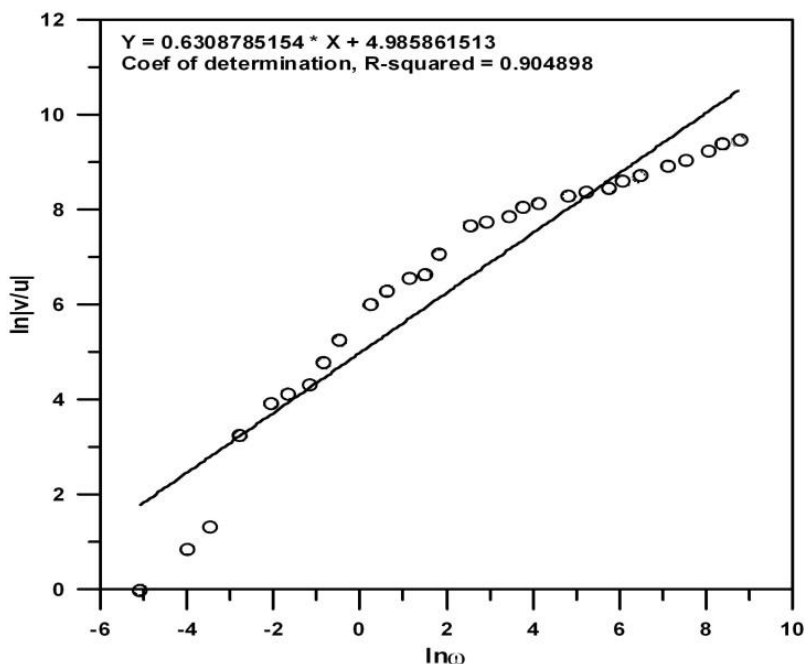
$$\alpha = 1 - \frac{2}{\pi}(\Psi_1 - \Psi_2) = 1 - \frac{2}{\pi} \left( \text{tg}^{-1} \frac{\varepsilon''_1}{\varepsilon_0 - \varepsilon'_1} + \text{tg}^{-1} \frac{\varepsilon''_1}{\varepsilon'_1 - \varepsilon_\infty} \right) \quad (5.15)$$

$$\tau = \frac{1}{\omega} \left[ \frac{(\varepsilon_0 - \varepsilon'_1)^2 + \varepsilon''_1{}^2}{(\varepsilon'_1 - \varepsilon_\infty)^2 + \varepsilon''_1{}^2} \right]^{\frac{1}{2(1-\alpha)}} \quad (5.16)$$

Z równań (5.13) i (5.14) wyznacza się ostatecznie charakterystykę przedstawioną na rysunku 5.5, na podstawie której można obliczyć wartości parametrów  $\alpha$  i  $\tau$  modelu Cole-Cole. Wartość stałej czasowej  $\tau$  określa wówczas punkt przecięcia aproksymacji liniowej z osią  $\ln|v/u|$ , natomiast współczynnik  $\alpha$  jest równy współczynnikowi kierunkowemu tej aproksymacji.



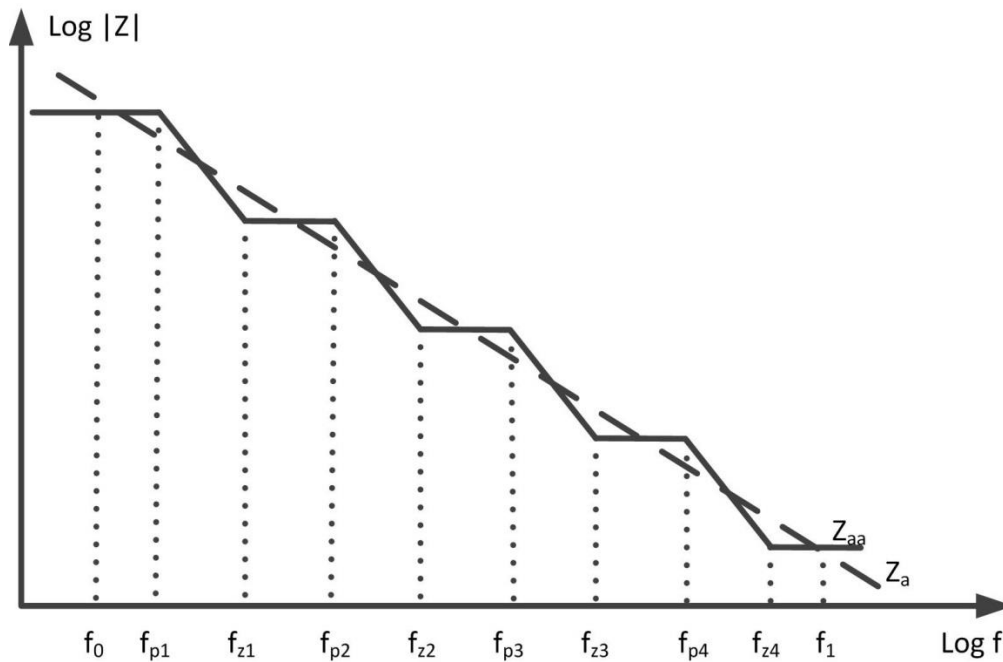
Rys. 5.4. Sposób wyznaczania stałej czasowej  $\tau$  oraz współczynnika  $\alpha$  modelu Cole-Cole z charakterystyki przenikalności zespolonej,  $R$  - promień okręgu,  $(x_0, y_0)$  - współrzędne środka okręgu [143]



Rys. 5.5. Sposób wyznaczenia  $\tau$  oraz  $\alpha$  modelu Cole-Cole

#### 5.4 Metoda obliczenia parametrów schematu zastępczego w oparciu o metodę aproksymacji ziarnistej

Operator  $s$  impedancji charakterystycznej  $Z_a(s)$  modelu Cole-Cole (wzór 5.9) jest przeważnie w potęgze niecałkowitej ( $0 \leq s < 1$ ), zatem wyznaczenie wartości elementów schematu zastępczego impedancji  $Z_a$  możliwe jest np. przy pomocy aproksymacji ziarnistej. Polega ona głównie na tworzeniu alternatywnych biegunów oraz miejsc zerowych impedancji  $Z_a(s)$  w założonym przedziale częstotliwości ( $f_0$ - $f_1$ ). Rysunek 5.6 przedstawia w sposób poglądowy ideę przedstawianej metody aproksymacji. W wyniku przeprowadzonej aproksymacji otrzymujemy nową operatorową impedancji charakterystyczną  $Z_{aa}(s)$ , którą w łatwy sposób da się przedstawić w postaci schematu szeregowo-równoległego RC [1, 141].



Rys. 5.6 Metoda aproksymacji ziarnistej impedancji  $Z_{aa}$  [141]

$f_0$  – częstotliwość początkowa,  $f_1$  – częstotliwość końcowa,  $f_p$  – częstotliwość wystąpienia bieguna impedancji  $Z_{aa}$ ,  $f_z$  – częstotliwość wystąpienia zera impedancji  $Z_{aa}$ .

Mając ustalony zakres częstotliwości, który dla izolacji celulozowo-olejowej można przyjąć  $f_0=10^{-3}\text{Hz}$ ,  $f_1=10^3\text{Hz}$ , obliczenia rozpoczyna się od obliczenia minimalnej zalecanej liczby  $n$  biegunów oraz impedancji  $Z_{aa}$  zgodnie ze wzorem:

$$n = \frac{3}{2} \log \frac{f_1}{f_0} \quad (5.17)$$

Pozostało jeszcze określenie wartości częstotliwości, dla których występują alternatywne bieguny oraz miejsca zerowe impedancji operatorowej  $Z_{aa}$ . Obliczenia te przeprowadza się zgodnie z wzorami 5.18 oraz 5.19, natomiast nową aproksymowaną impedancję charakterystyczną  $Z_{aa}$  określa zależność 5.20.

$$f_{pi} = f_0 \left( \frac{f_1}{f_0} \right)^{\frac{2i-1-\alpha}{2n}} \quad (5.18)$$

$$f_{zi} = f_0 \left( \frac{f_1}{f_0} \right)^{\frac{2i-1+\alpha}{2n}} \quad (5.19)$$

$$Z_{aa}(s) = |Z_a(f_0)| \prod_{i=1}^n \frac{\frac{s}{\omega_{zi}} - 1}{\omega_{pi} - 1} \quad (5.20)$$

gdzie:  $\omega_p$  – pulsacja wystąpienia bieguna impedancji  $Z_{aa}$ ,

$\omega_z$  – pulsacja wystąpienia zera impedancji  $Z_{aa}$ ,

$i = 1, 2, \dots, n$

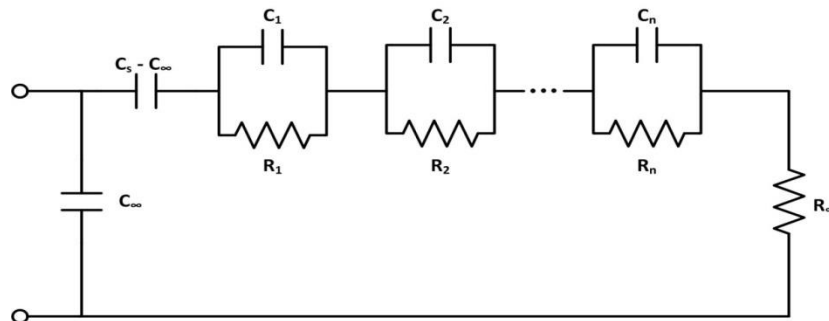
Do określenia wartości RC szeregowo-równoległego schematu zastępczego izolacji celulozowo-olejowej pozostał rozkład impedancji  $Z_{aa}(s)$  na ułamki proste zgodnie z wzorami:

$$Z_{aa}(s) = R_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{\frac{s}{\omega_{pi}} - 1} \quad (5.21)$$

$$R_\infty = |Z_a(f_0)| \prod_{i=1}^n \frac{\omega_{pi}}{\omega_{zi}} \quad (5.22)$$

$$R_i = Z_{aa}(s) \left( \frac{s}{\omega_{pi}} - 1 \right) \Big|_{s=-\omega_{pi}}, \quad C_i = \frac{1}{\omega_{pi} R_i} \quad 5.23$$

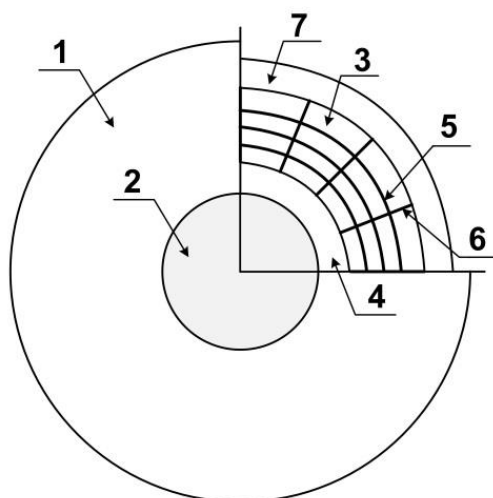
Ostatecznie elementy R i C tworzy szeregowo-równoległego schemat zastępczy o znanej ilości gałęzi, który przedstawia rysunek 5.7.



Rys. 5.7. Szeregowo-równoległy schemat zastępczy izolacji celulozowo-olejowej opracowany w oparciu o model Cole-Cole [141]

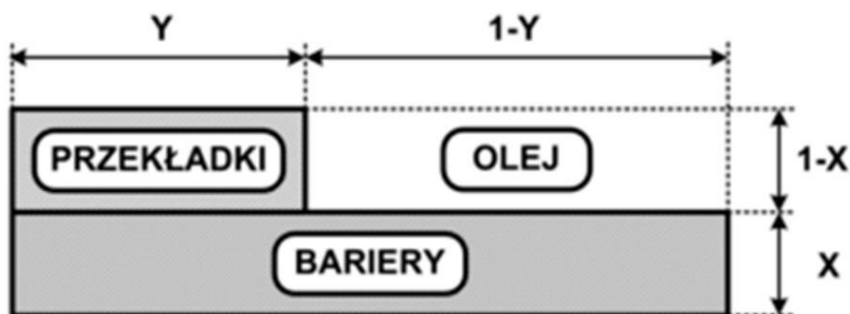
## 5.5 Schemat zastępczy izolacji głównej transformatora według modelu X-Y

Najczęstszy spotykany układ izolacji głównej olejowego transformatora energetycznego w sposób uproszczony pokazano na rysunku 5.8. Najbliżej rdzenia znajduje się uzwojenie dolnego napięcia (DN), które jest otoczone uzwojeniem górnego napięcia (GN). Uzwojenia górnego oraz dolnego napięcia są oddzielone od siebie głównym kanałem izolacyjnym. Jest on zbudowany z kilku cylindrycznie rozmieszczonych warstw grubego preszpanu, odseparowanych od siebie umieszczonymi osiowo przekładkami. Przestrzeń pomiędzy warstwami (barierami) i przekładkami wypełnia olej izolacyjny [49, 74, 97, 114, 121].



Rys. 5.8. Poglądowy system głównej izolacji celulozowo-olejowej transformatora energetycznego [121]  
1 – jarzmo, 2 – rdzeń, 3 – kanał olejowy, 4 – uzwojenie DN, 5 – bariera, 6 – przekładka preszpanowa, 7 – uzwojenie GN

Natomiast uproszczony model geometryczny izolacji celulozowo-olejowej transformatora energetycznego, tzw. model X-Y przedstawia rysunek rysunku 5.9 [141].



Rys. 5.9. Uproszczony model geometryczny izolacji celulozowo-olejowej transformatora [141]

Model X-Y zbudowany jest z trzech podstawowych części izolacji głównej transformatora, tzn. barier, przekładek i kanałów olejowych, których wymiary odzwierciedlają procentowy udział poszczególnych materiałów (papier celulozowy i olej) w konstrukcji transformatora. Elementy te tworzą układ szeregowo-równoległy. Parametry X oraz Y wyrażają wzory:

$$X = \frac{G_B}{G_K}, \quad Y = \frac{S_P}{O_K} \quad (5.24)$$

gdzie:  $G_B$  – grubość wszystkich barier,

$G_K$  – grubość kanału izolacyjnego,

$S_P$  – całkowita szerokość wszystkich przekładek,

$O_K$  – zewnętrzny obwód kanału izolacyjnego.

Wartości X i Y powinny wyznaczać się na podstawie rysunków konstrukcyjnych transformatora. W rzeczywistości parametr X zmienia się w granicach od 0,2 do 0,5, a parametr Y od 0,15 do 0,25 [49, 141]. Znając charakterystyki przenikalności w funkcji częstotliwości oraz temperatury, preszpanu ( $\epsilon_{\text{preszpan}}(\omega, T)$ ) impregnowanego olejem i oleju izolacyjnego ( $\epsilon_{\text{olej}}(\omega, T)$ ), można wyznaczyć charakterystykę przenikalności w funkcji częstotliwości oraz temperatury dla całego modelu ( $\epsilon_{X-Y}(\omega, T)$ ) zgodnie ze wzorami (5.25) oraz (5.26).

$$\epsilon_{X-Y}(\omega, T) = \frac{Y}{\frac{1-X}{\epsilon_{\text{przekładka}}} + \frac{X}{\epsilon_{\text{bariera}}}} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\epsilon_{\text{olej}}} + \frac{X}{\epsilon_{\text{bariera}}}} \quad (5.25)$$

$$\epsilon_{\text{olej}} = \epsilon_{r \text{ olej}} - j \frac{\gamma(T)}{\epsilon_0 \omega} \quad (5.26)$$

gdzie:  $\epsilon_{\text{przekładka}} = \epsilon_{\text{bariera}} = \epsilon_{\text{preszpan}}(\omega, T)$ ,

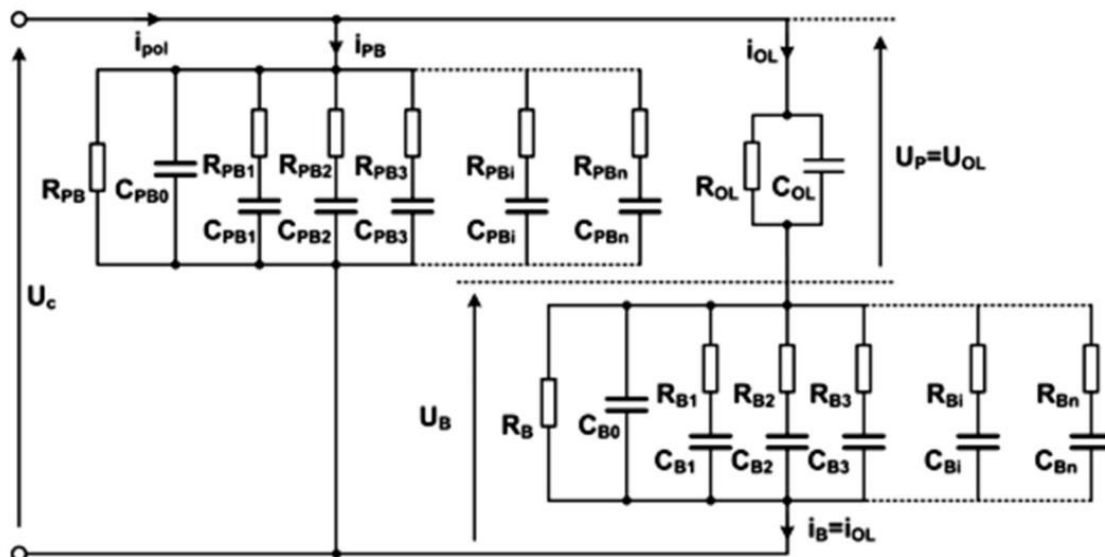
$\epsilon_{r \text{ olej}}$  – przenikalność elektryczna względna oleju ( $\epsilon_{r \text{ olej}} \approx 2,2$ ),

$\gamma(T)$  – konduktywność oleju w funkcji temperatury.

Uproszczenie geometrii głównej izolacji celulozowo-olejowej transformatora pozwoliło zbudować elektryczny schemat zastępczy tej izolacji (rys. 5.10), wykorzystując model



odpowiedzi dielektrycznej Debye'a z wieloma czasami relaksacji [141]. Szeregowo-równoległe połączenie elementów R i C reprezentuje odpowiednio schematy elektryczne kanału olejowego, barier oraz szeregowych połączeń przekładek i barier.



Rys. 5.10. Elektryczny schemat zastępczy głównej izolacji transformatora modelu X-Y [141]

Wykonując diagnostykę stanu izolacji celulozowo-olejowej metodami polaryzacyjnymi można relaksację dielektryczną oleju izolacyjnego pominąć ze względu na jej małą wartość [132]. W związku z tym jedynie elementy  $R_{OL}$  i  $C_{OL}$  modelują kanał olejowy, a ich wartość można wyznaczyć przy pomocy wzorów:

$$R_{OL} = \frac{\varepsilon_0}{C_0} \left( \frac{1-X}{1-Y} \right) \quad (5.27)$$

$$C_{OL} = C_0 \varepsilon_{r \text{ olej}} \left( \frac{1-Y}{1-X} \right) \quad (5.28)$$

Pojemność geometryczną  $C_0$  układu izolacyjnego między uzwojeniami DN i GN transformatora, można obliczyć przy pomocy wzoru na pojemność kondensatora cylindrycznego (5.29) lub z zależności ilorazu zmierzonej pojemności badanej izolacji  $C_{iz}$  i rzeczywistej przenikalności elektrycznej układu  $\varepsilon_{iz}$  (5.30).

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\log \frac{r_{GN}}{r_{DN}}} \quad (5.29)$$

gdzie:  $h$  – wysokość uzwojeń,

$r_{GN}$  – zewnętrzny promień izolacji głównej,

$r_{DN}$  – wewnętrzny promień izolacji głównej.

$$C_0 = \frac{C_{iz}}{\epsilon_{iz}}, \quad \epsilon_{iz} = \frac{\epsilon_{preszpan}\epsilon_{olej}}{\epsilon_{preszpan}X + \epsilon_{olej}(1 - X)} \quad (5.30)$$

Czynniki mające wpływ na wartość parametrów elektrycznego schematu zastępczego głównej izolacji celulozowo-olejowej to przede wszystkim: stopień zawilgocenia oraz zesterzenia izolacji, temperatura, zawartość produktów procesów starzeniowych, rodzaj zastosowanych materiałów (papier celulozowy, olej).

## 6. Stanowisko do badań laboratoryjnych próbek izolacji celulozowo-olejowej z wykorzystaniem metody FDS

### 6.1 Układ pomiarowy

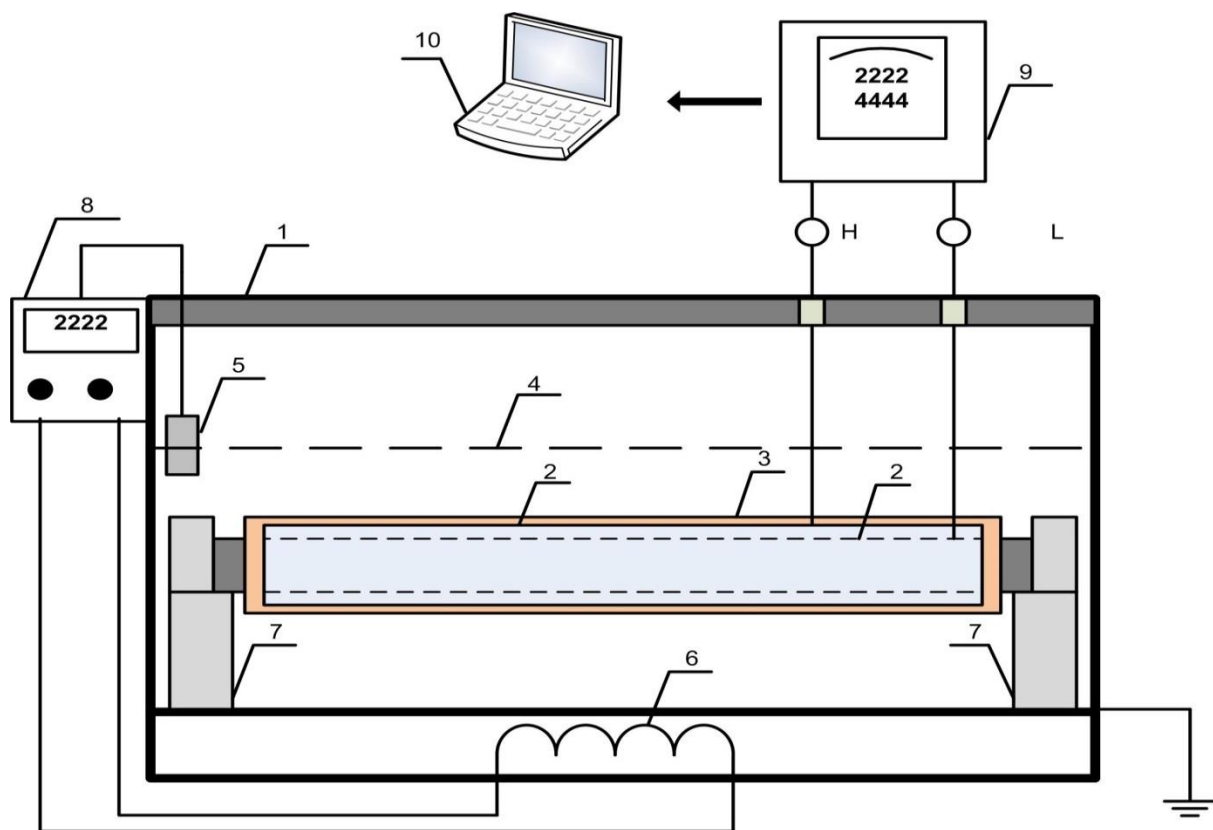
Stacjonarny, laboratoryjny układ pomiarowy do diagnostyki próbek izolacji celulozowo-olejowej metodą FDS przedstawia rysunek 6.2. Na rysunku 6.3 pokazano natomiast konfigurację układu elektrod oraz miejsce lokalizacji badanej próbki izolacji. Do pomiarów wykorzystano miernik LCR HiTESTER 3522-50 firmy Hioki (rys. 6.1). Miernik pozwala na wykonywanie pomiarów w zakresie częstotliwości od  $10^{-3}$  Hz do  $10^5$  Hz przy stałym napięciu odniesienia. Podczas laboratoryjnych eksperymentalnych pomiarów został ustalony zakres od  $10^{-3}$  Hz do  $10^3$  Hz. Precyzyjna cyfrowa regulacja poziomu częstotliwości dzięki wbudowanemu ekranowi dotykowemu, rysunek 6.4 oraz stałe napięcie odniesienia umożliwiło analizę zmian wartości współczynnika stratności ( $\text{tg}\delta$ ), pojemności (C) oraz zespolonej przenikalności elektrycznej ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) próbek izolacji celulozowo-olejowej.

Dane techniczne miernika LCR HiTESTER 3522-50 [56]:

- napięcie pomiarowe 5 V,
- prąd pomiaru 0,01 mA,
- zakres częstotliwości od  $10^{-3}$  do  $10^5$  Hz,
- dokładność ustawienia częstotliwości pomiarowej  $\pm 0,005$  %,
- zakres pomiaru współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  od 0,00001 do 9,99999 ,
- zakres pomiaru pojemności od 0,32 pF do 1 F,
- dokładność podstawowa pomiaru impedancji  $Z \pm 0,08\%$ ,  $\theta \pm 0,05^\circ$

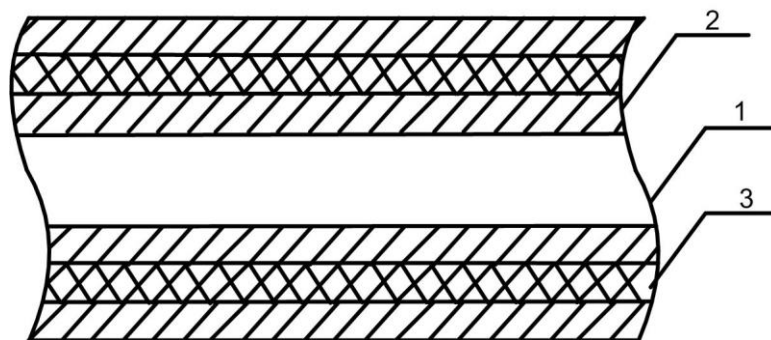


Rys. 6.1. Miernik LCR HiTESTER 3522-50 wykorzystany w pomiarach [56]



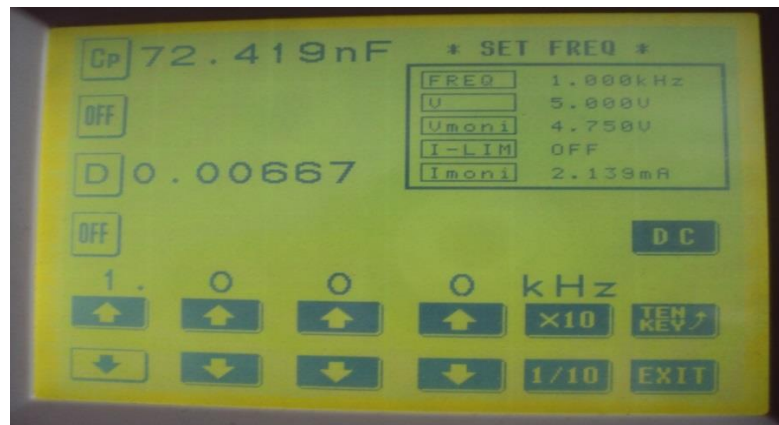
Rys. 6.2. Laboratoryjny układ do badania próbek izolacji papierowo-olejowej za pomocą metody spektroskopii częstotliwościowej (FDS)

1 – naczynie pomiarowe, 2 – elektrody, 3 – badana izolacja celulozowa, 4 – poziom oleju, 5 – czujnik temperatury, 6 – grzałka, 7 – izolatory teflonowe, 8 – sterownik temperatury PID, 9 – miernik, 10 – komputer



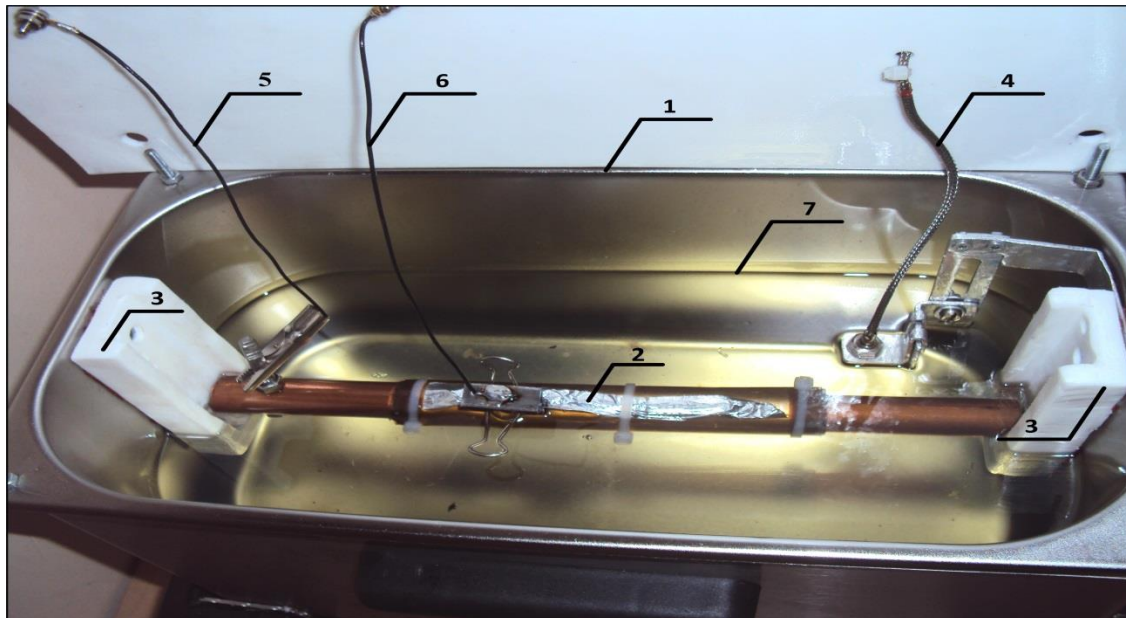
Rys. 6.3. Uproszczony przekrój konfiguracji elektrod oraz umiejscowienie badanej izolacji

1 – elektroda niskiego potencjału, 2 – elektroda wysokiego potencjału, 3 – badana izolacja celulozowo-olejowa



Rys. 6.4. Widok ekranu dotykowego miernika LCR HiTESTER 3255-50

Próbki izolacji celulozowo-olejowej umieszczono w hermetycznym metalowym naczyniu wykonanym ze stali nierdzewnej wypełnionym mineralnym olejem izolacyjnym rysunek 6.5. Zastosowanie naczynia ze stali nierdzewnej wyeliminowało możliwe utlenianie się innego metalu podczas kontaktu z mineralnym olejem izolacyjnym, co mogło by „zniekształcić” wykonywane pomiary.



Rys. 6.5. Naczynie pomiarowe zalane mineralnym olejem izolacyjnym oraz próbka izolacji celulozowo-olejowej;

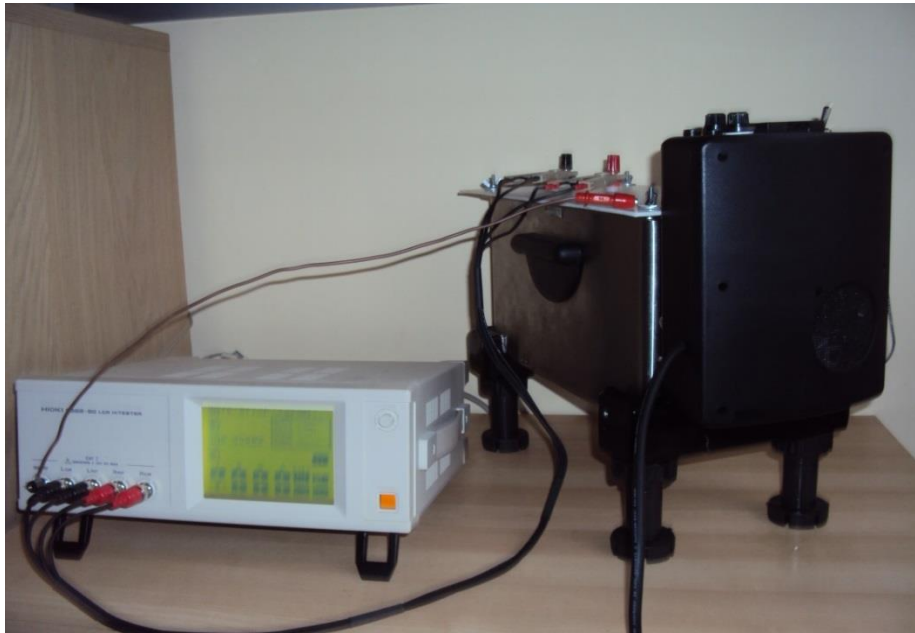
1 – naczynie pomiarowe, 2 – badana próbka izolacji celulozowej, 3 – izolatory teflonowe,  
 4 – czujnik temperatury, 5 – elektroda niskiego potencjału, 6 – elektroda wysokiego potencjału,  
 7 – poziom oleju

W trakcie wykonywania badań laboratoryjnych w sposób ciągły utrzymywano i kontrolowano temperaturę w naczyniu, w którym była zanurzona próbka izolacji celulozowo-olejowej. W tym celu wykorzystano mikroprocesorowy, dedykowany sterownik PID REX–C100 połączony z czujnikiem PT 100. Stabilizację temperatury zapewniła zabudowa pod naczyniem pomiarowym grzałki, co pozwoliło wyeliminować jej bezwładność. Tak zaprojektowany układ pozwolił uzyskać stabilizację temperatury w zakresie  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ . Badania przeprowadzono w zakresie temperatur od  $24^{\circ}\text{C}$  do  $60^{\circ}\text{C}$ . W trakcie badań wykorzystano świeży, nieinhibitowany mineralny olej izolacyjny firmy Nynas o oznaczeniu Nytro 10GBN. Tabela 6.1 przedstawia podstawowe parametry techniczne zastosowanego mineralnego oleju izolacyjnego.

Tabela 6.1. Parametry techniczne mineralnego oleju izolacyjnego

<b>Mineralny olej izolacyjny</b>	
Firma	Nynas
Oznaczenie	Nytro 10GBN
Rodzaj	Mineralny
Gęstość [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	0,886 ( $20^{\circ}\text{C}$ )
Lepkość [ $\text{mm}^2/\text{s}$ ]	8,9 ( $40^{\circ}\text{C}$ )
Liczba kwasowa [ $\text{mg KOH}/\text{g}$ ]	<0,01
Zawartość węglowodorów aromatycznych [%]	14
Zawilgocenie [ppm]	<20
Współczynnik stratności $\text{tg}\delta$	<0,001 ( $90^{\circ}\text{C}$ , 50 Hz)
Napięcie powierzchniowe [ $\text{mN}/\text{m}$ ]	49
Napięcie przebicia [kV]	40-60

Zdjęcie zamieszczone na rysunku 6.6 przedstawia widok ogólny stacjonarnego laboratoryjnego układu pomiarowego.



Rys. 6.6 Laboratoryjny układ do badania stanu izolacji celulozowo-olejowej metodą FDS

## 6.2 Przygotowanie próbek izolacji celulozowo-olejowej

Przeznaczone do badań próbki izolacji celulozowej wykonano z elektrotechnicznego papieru transformatorowego firmy Tervakoski o oznaczeniu Tertrans N 125, którego podstawowe parametry techniczne przedstawiono w tabeli 6.2. Pojedynczą próbkę stanowiły 2 paski papieru o rozmiarze  $140 \times 700$  mm, nawinięte na elektrodę niskiego potencjału ( $L$ ).

Tabela 6.2. Parametry techniczne papieru elektrotechnicznego

<b>Papier elektrotechniczny</b>	
Firma	Tervakoski
Oznaczenie	Tertrans N 125
Rodzaj	Transformatorowy
Stopień DP	1150
Gramatura [ $\text{kg/m}^2$ ]	0,1
Grubość [ $\mu\text{m}$ ]	122,9
Gęstość [ $\text{kg/m}^3$ ]	790
Wytrzymałość na rozciąganie [ $\text{kN/m}$ ]	11,0
Opór przedarcia [ $\text{mN}$ ]	1201

Celem zróżnicowania próbek pod względem stopnia zawilgocenia papieru, próbki poddano wstępnemu suszeniu w temperaturze 120°C pod próżnią. Następnie wyznaczono wagę początkową badanej próbki. Do wyznaczenia wagi początkowej oraz przyrostu wagi próbki izolacji użyto wagi firmy Fawag ONYX OX-200 o dokładności pomiarowej  $\pm 0,0001$  g. Pomiar odbywał się w pomieszczeniu o stałym zawilgoceniu i kontrolowanym ciśnieniu przy pomocy stacji meteo. Śledzenie przyrostu wagi w wyniku migracji wilgoci z powietrza do papieru umożliwiło wyznaczenie kolejnych stopni zawilgocenia próbek papieru (pomiar wykonywane były w zakresie zawilgocenia od 0% do 4%). Tabela 6.3, przedstawia dokładne wartości pomiaru wzrostu wagi próbki (dla próbki nie starzonej termicznie) oraz parametry otoczenia, w których odbywało się wyznaczenie kolejnych zawilgoceń próbki. Po etapie zawilgacania ostatecznie papier impregnowano olejem i zamykano w hermetycznych pojemnikach. Dzięki opisanej procedurze uzyskano próbki izolacji celulozowo-olejowej o 5 stopniowej wartości zawilgocenia.

Tabela 6.3. Wartości przyrostu wagi próbki (niestarzonej termicznie) izolacji celulozowo-olejowej oraz wartości panującego otoczenia

p = 1018 [hPa], T = 23°C, w = 55%				
Waga początkowa	1% (po 135 [s])	2% (po 2700 [s])	3% (po 7800 [s])	4% (po 9200 [s])
0,2864 [g]	0,2893 [g]	0,2921 [g]	0,2950 [g]	0,2978 [g]

Zróżnicowanie próbek izolacji celulozowej pod względem stopnia zestarzenia uzyskano wygrzewając nowy papier zgodnie z cyklem przedstawionym w tabeli 6.4.

Tabela 6.4. Oznaczenie próbek

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°C pod próżnią) 2 – termiczne starzenie papieru w 150°C przez 25 h plus suszenie 3 – termiczne starzenie papieru w 170°C przez 25 h plus suszenie				



Po etapie przyspieszonego starzenia termicznego nieimpregnowanego papieru, próbkę suszono pod próżnią w 120°C (rys. 6.7). Następnie próbki poddawano procesowi zawilgacania i ustalano metodą wagową jego stopień, tak samo jak w przypadku próbki nie starzonej. Uzyskano w ten sposób 15 próbek izolacji celulozowo-olejowej o zróżnicowanym stopniu zestarzenia i zawilgocenia.

Ostatnim etapem przygotowania próbek było poddanie ich procesowi impregnacji mineralnym olejem izolacyjnym. W celu uzyskania prawidłowego procesu impregnacji, w tym ustalenia równowagi hydrodynamicznej celuloza-olej oraz wytrącenia ewentualnych pęcherzyków powietrza, wszystkie próbki izolacji poddano kilkudniowemu sezonowaniu w oleju w podwyższonej temperaturze.



Rys. 6.7 Laboratoryjny układ próżniowy do suszenia papieru

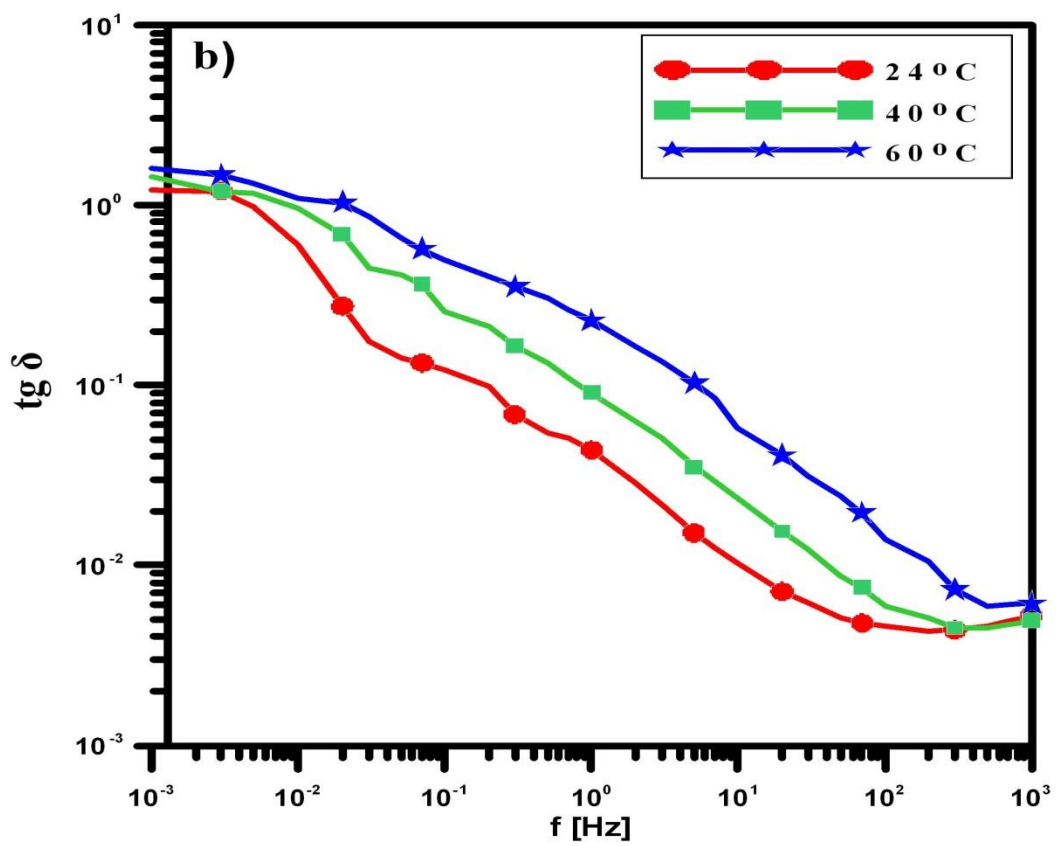
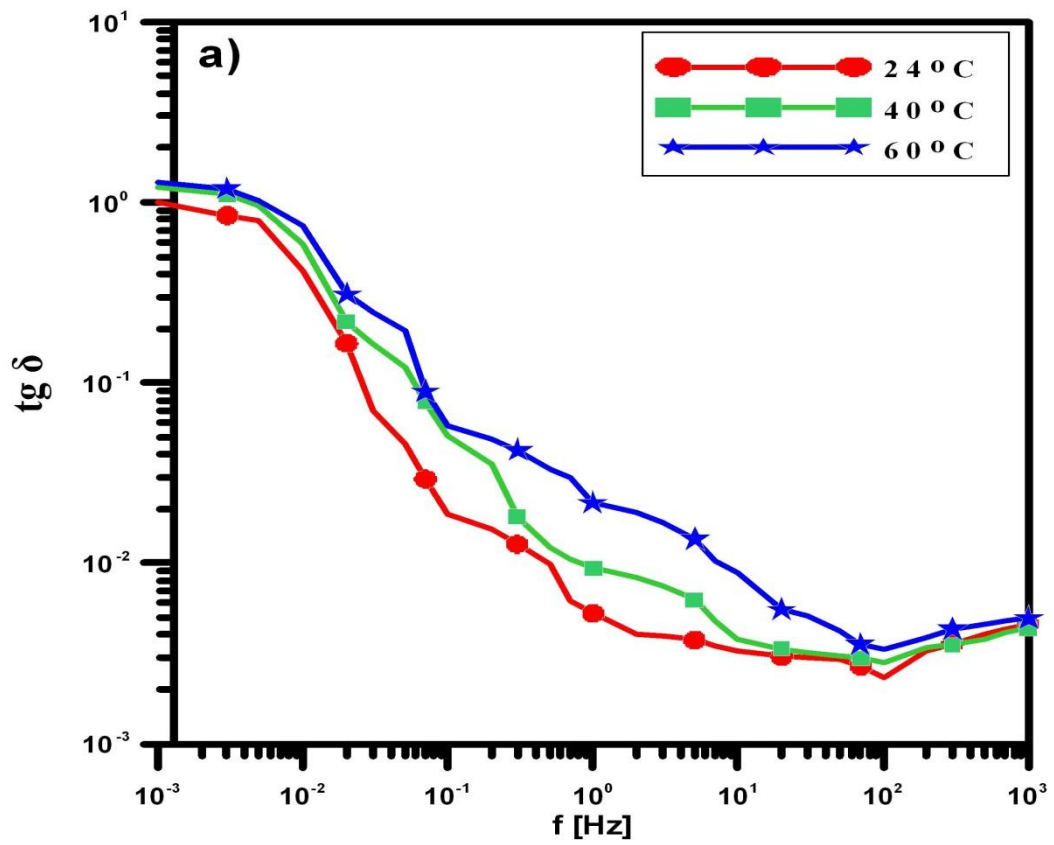
## **7. Analiza wpływu temperatury na parametry modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej**

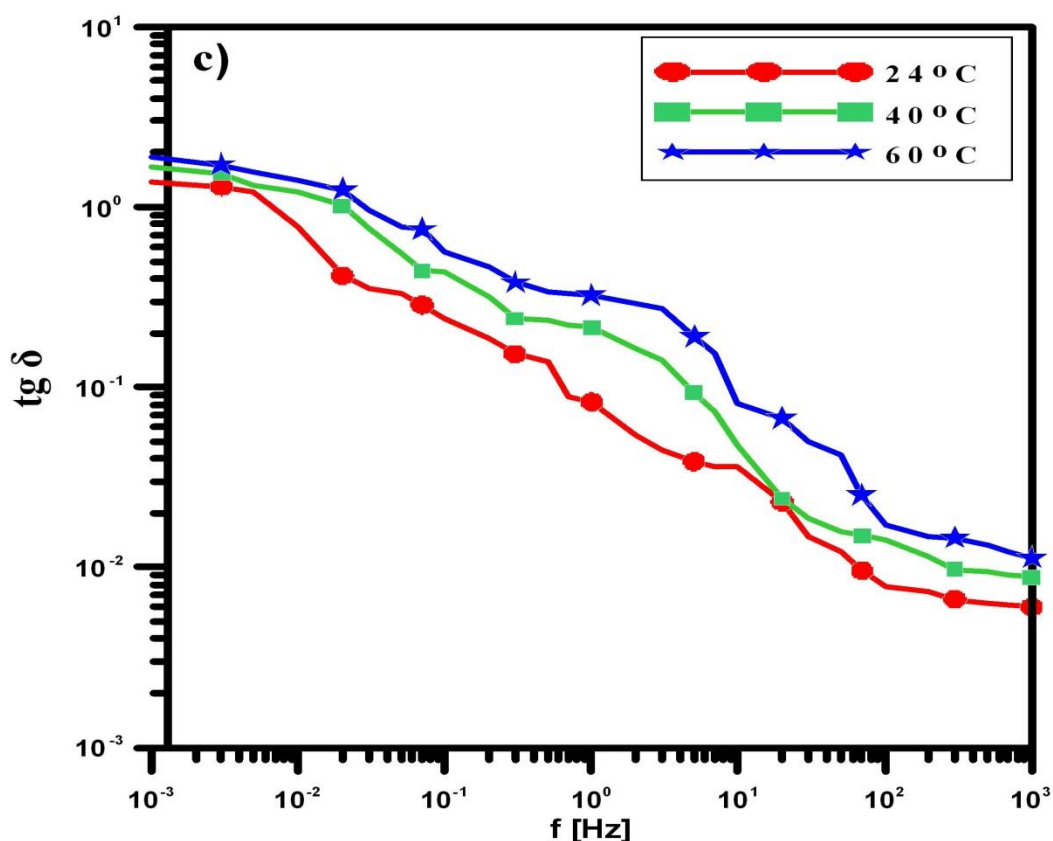
Celem badań eksperymentalnych było określenie wpływu temperatury na parametry modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej w oparciu o pomiary wykonywane metodą spektroskopii częstotliwościowej FDS. Na podstawie otrzymanych wyników dokonano analizy pod kątem ich przydatności w przyszłej diagnostyce transformatorów energetycznych.

### **7.1 Charakterystyki dyspersyjne współczynnika stratności $\text{tg}\delta$ i pojemności C**

Eksperymentalne badania laboratoryjne wykonane metodą FDS pozwoliły na wyznaczenie charakterystyk dyspersyjnych współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  i pojemności C próbek izolacji celulozowo-olejowej. Procedurę pomiarową oraz wykorzystany w czasie pomiarów metodą FDS laboratoryjny układ pomiarowy został dokładnie opisany w podrozdziale 6.1 niniejszej pracy. Badania przeprowadzono na odpowiednio wcześniej przygotowanych próbkach, których przygotowanie i oznaczenie zostało opisane w podrozdziale 6.2.

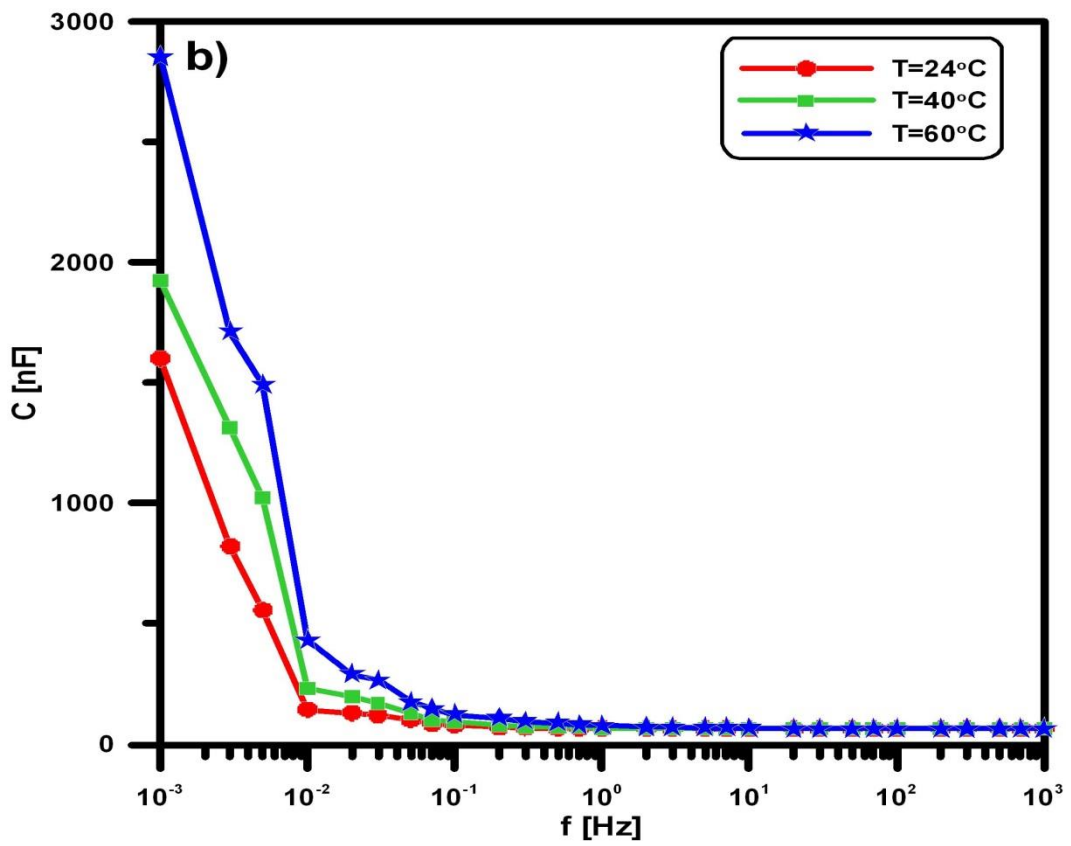
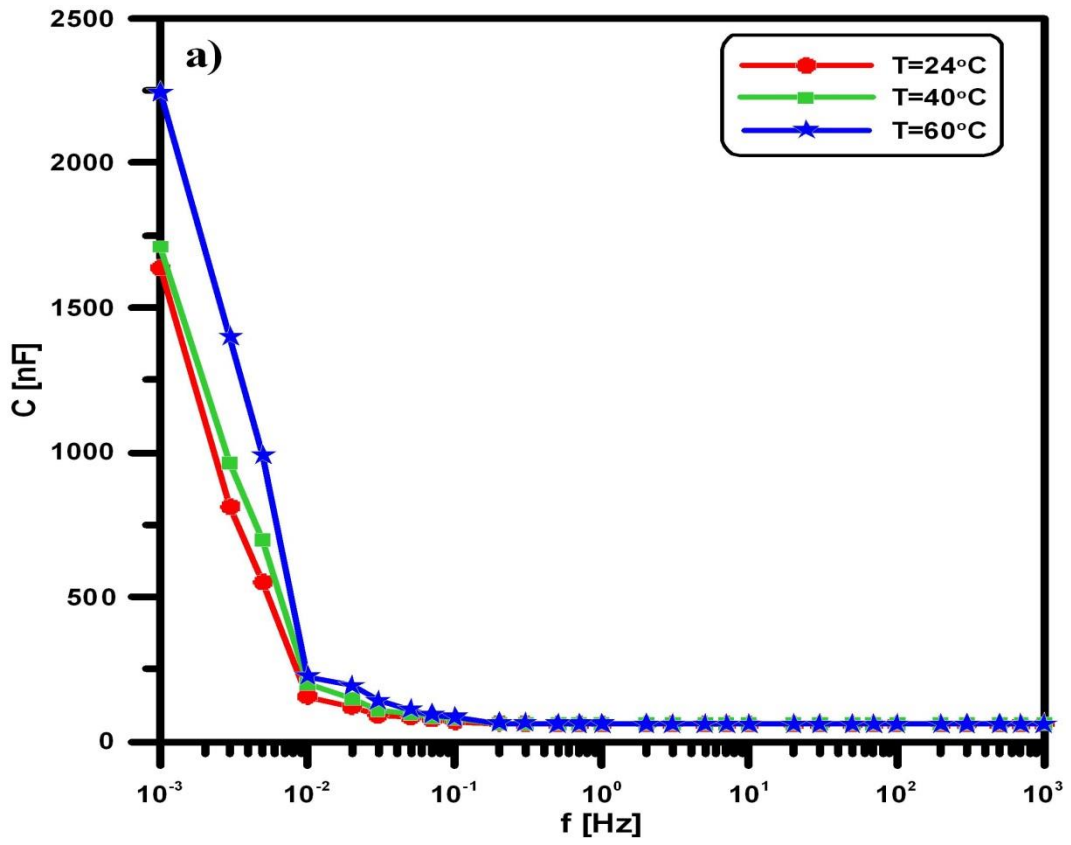
Na rysunku 7.1 pokazano przykładowe charakterystyki współczynnika stratności  $\text{tg}\delta(f)$ , natomiast na rysunku 7.2 przykładowe charakterystyki pojemności  $C(f)$ , dla próbek izolacji celulozowo-olejowej o różnym stopniu zawilgocenia i zesterzenia. Na charakterystykach przedstawiono oddziaływanie temperatury, uwzględniając najniższą, średnią oraz najwyższą temperaturę eksperymentu.

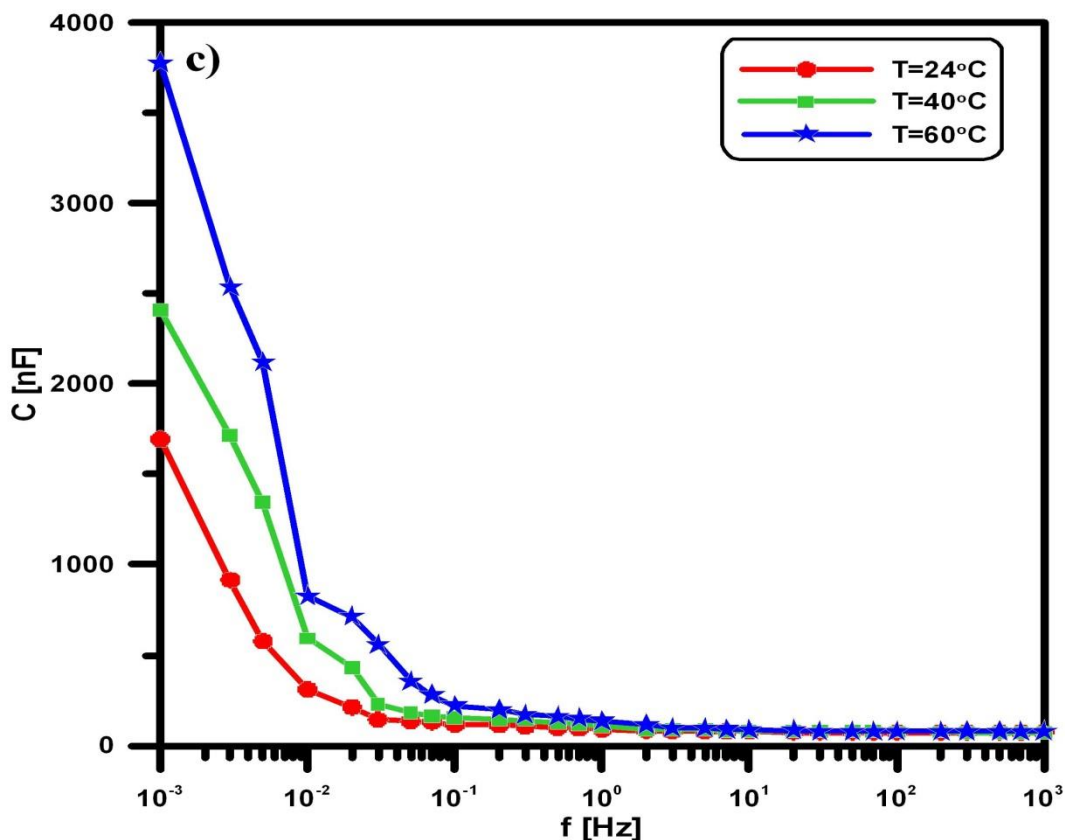




Rys. 7.1. Przykładowe charakterystyki współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  w funkcji temperatury,  
 a – próbka 1A ( suszenie papieru w 120°C o zawilgoceniu  $w \leq 0,5\%$  ),  
 b – próbka 2C ( termiczne starzenie papieru w 150°C o zawilgoceniu  $w = 2\%$  ),  
 c – próbka 3E ( termiczne starzenie papieru w 170°C o zawilgoceniu  $w = 4\%$  ).

Analizując otrzymane charakterystyki dyspersyjne współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  w funkcji temperatury zaobserwowano, że rosnąca temperatura wywołuje wzrost wartości tego współczynnika. Na tej podstawie można powiedzieć, że straty dielektryczne próbek izolacji celulozowo-olejowej rosną wraz ze wzrostem temperatury. Wniosek ten jest szczególnie widoczny w środkowej części charakterystyki, tj. w przedziale częstotliwości od 10<sup>-2</sup> Hz do 10<sup>2</sup> Hz. Główną przyczyną tego zjawiska jest rosnące wraz z temperaturą przewodnictwo oleju izolacyjnego (zgodnie z rys. 4.3, str. 28). Podobne rezultaty uzyskano dla wszystkich pozostałych przebadanych próbek ujętych w tabeli 6.4. ze strony 51.





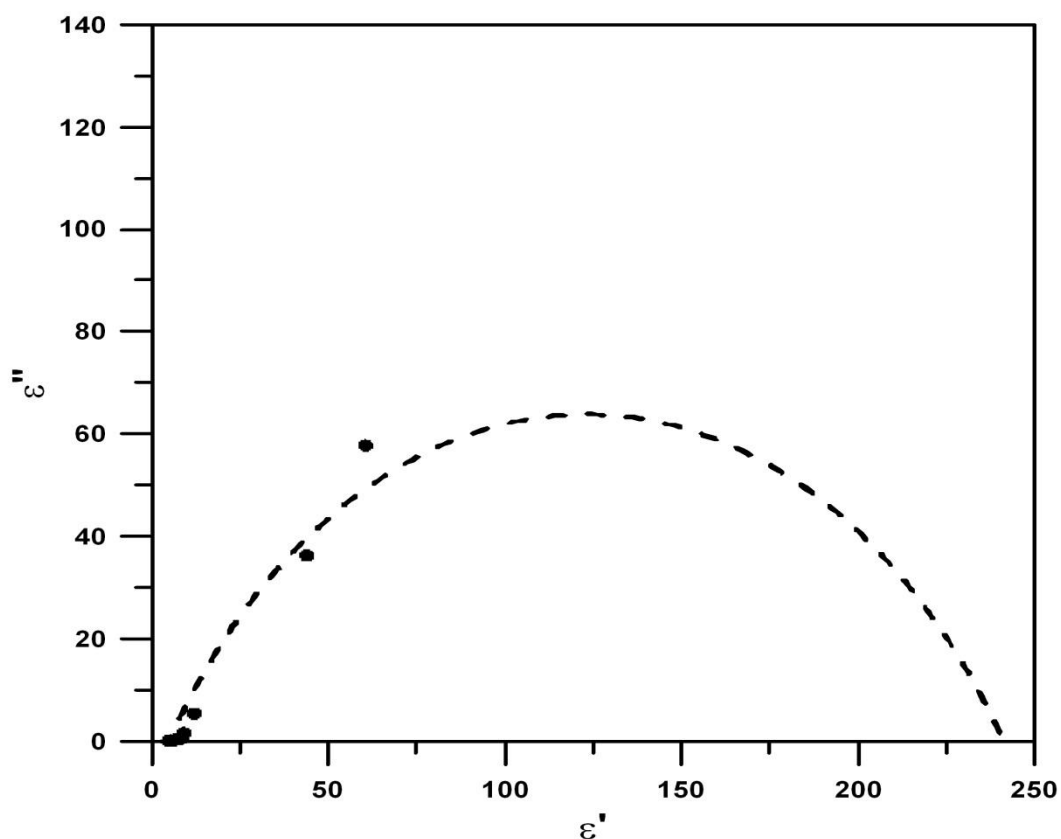
Rys. 7.2. Przykładowe charakterystyki pojemności C w funkcji temperatury,

- a – próbka 1A ( suszenie papieru w 120°C o zawilgoceniu w  $\leq 0,5\%$  ),
- b – próbka 2C ( termiczne starzenie papieru w 150°C o zawilgoceniu w = 2% ),
- c – próbka 3E ( termiczne starzenie papieru w 170°C o zawilgoceniu w = 4% ).

Przykładowe charakterystyki dyspersyjne pojemności C próbek izolacji celulozowo-olejowej zamieszczone na rys.7.2 pozwalają ocenić wpływ temperatury na izolację. Wzrost temperatury powoduje wzrost pojemności, jednak możemy zauważyć, że przy częstotliwościach niższych tzn.  $\leq 10^{-1}$  Hz następuje znaczne przyspieszenie wzrostu pojemności izolacji. Na charakterystykach z rys. 7.2 widzimy ponadto, że wzrost wartości pojemności następuje niezależnie od próbki, tzn. stopnia jej zawilgocenia oraz zestarzenia. Przebadane wszystkie pozostałe próbki (zgodnie z tabelą 6.4) wykazują analogiczne właściwości.

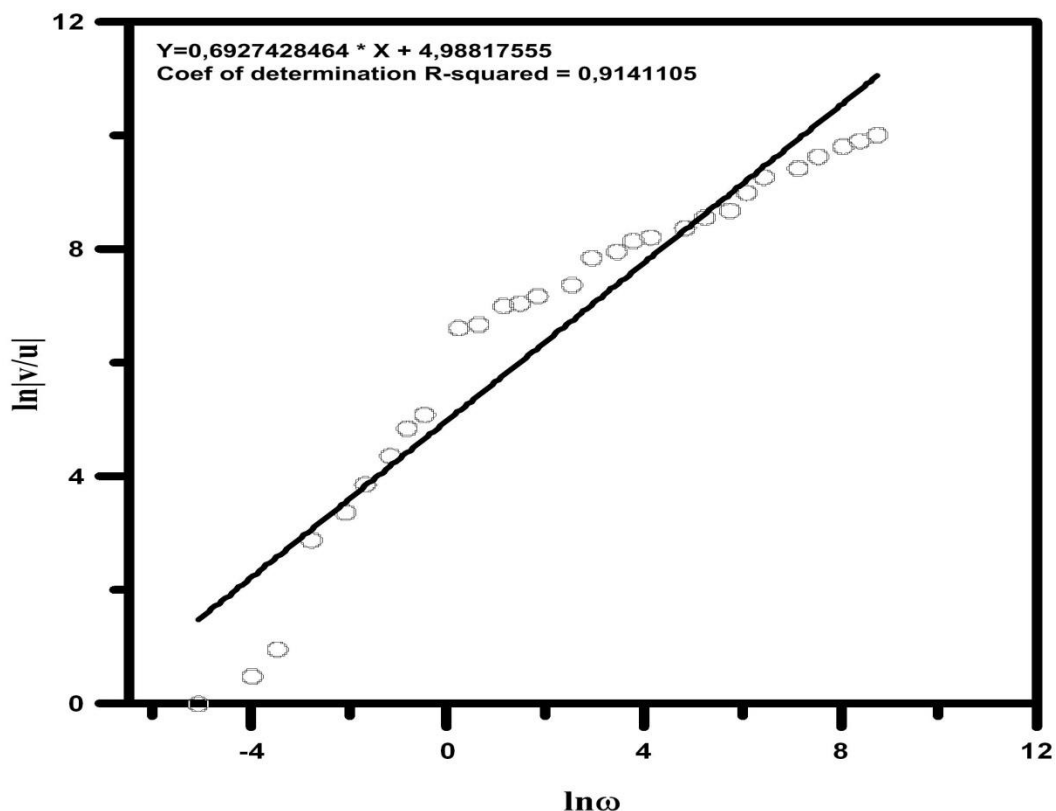
## 7.2 Charakterystyki parametrów $\alpha$ oraz $\tau$ modelu Cole-Cole

Na podstawie wyników pomiarów eksperymentalnych wykonanych metodą FDS, można obliczyć według wzorów z rozdziału 5 (tzn. 5.12), wartości zespolonej przenikalności  $\epsilon'$  oraz  $\epsilon''$ . Mając wyznaczone wartości zespolonej przenikalności ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ), stałą czasową  $\tau$  oraz współczynnik  $\alpha$  modelu Cole-Cole obliczyć można w oparciu o wzory (5.13), (5.14), (5.15), (5.16). Dokładny opis sposobu wyznaczenia parametrów  $\alpha$  oraz  $\tau$  został opisany w podrozdziale 5.3. Na rysunku 7.3 pokazano wykres zespolonej przenikalności ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) modelu Cole-Cole, jaki uzyskano w oparciu o przykładowe dane eksperymentalne.



Rys. 7.3. Wykres typu Cole-Cole przykładowej próbki 1A ( suszenie papieru w 120°C o zawilgoceniu w  $\leq 0,5\%$  ) w temperaturze 60° C.

Na rysunku 7.4 pokazano sposób wyznaczenia parametrów  $\alpha$  oraz  $\tau$  modelu Cole-Cole przykładowej próbki.



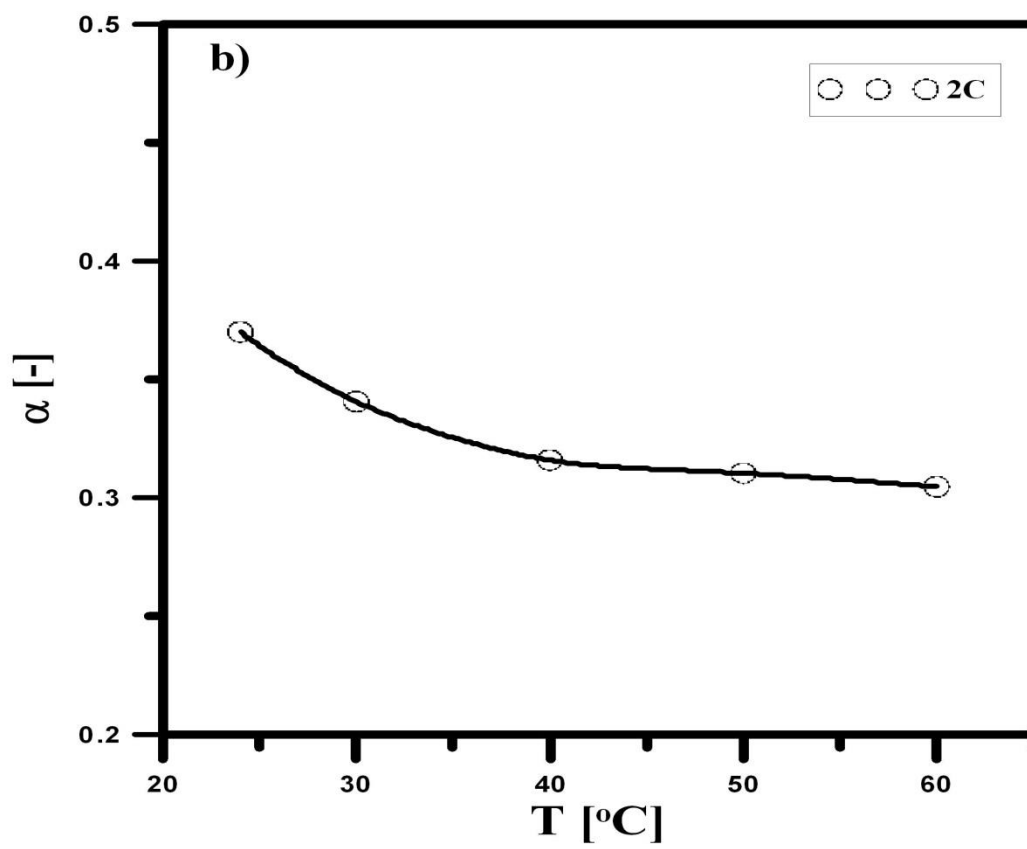
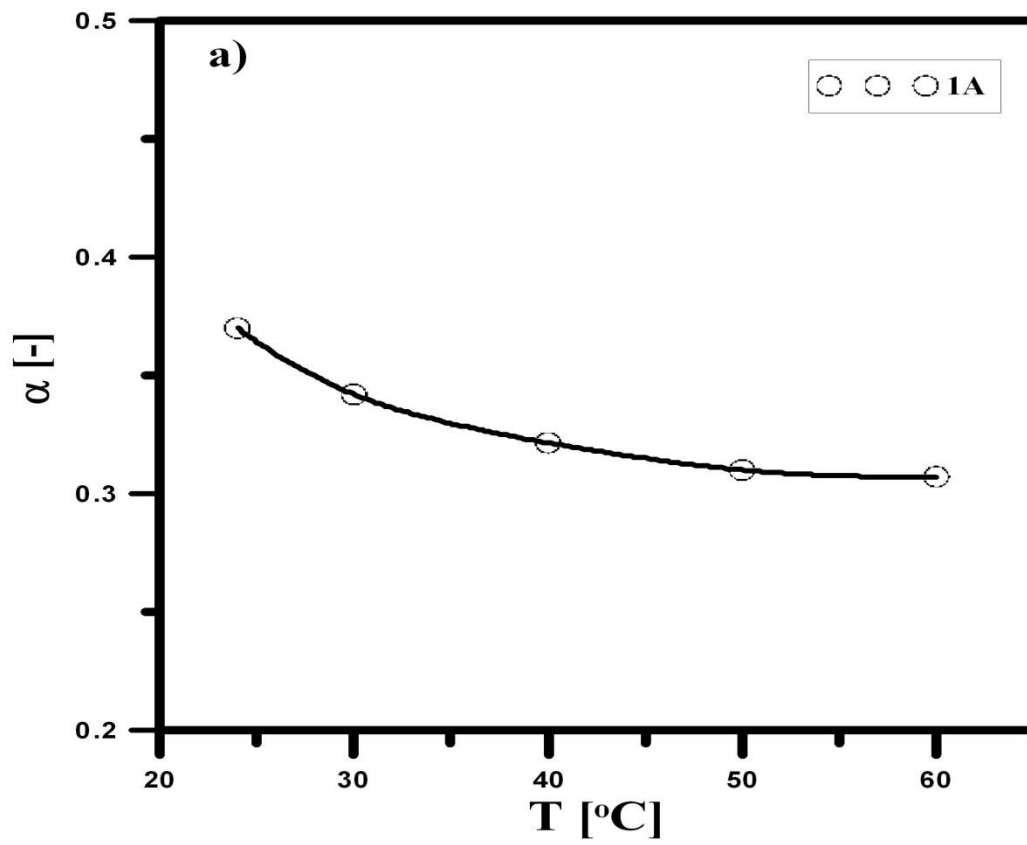
Rys. 7.4. Sposób wyznaczenia parametrów  $\alpha$  oraz  $\tau$  modelu Cole-Cole przykładowej próbki 1A (suszenie papieru w 120°C o zawilgoceniu  $w \leq 0,5\%$ ) w temperaturze 60° C.

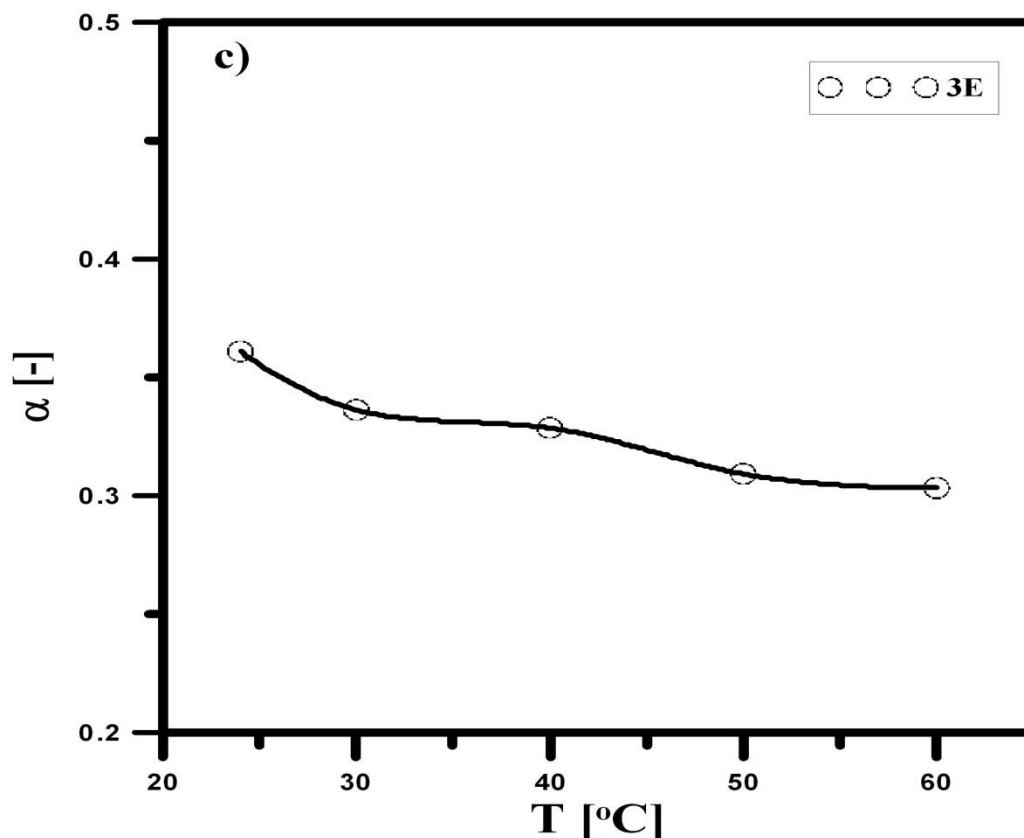
Rysunki 7.5 i 7.6 przedstawiają odpowiednio charakterystyki współczynnika  $\alpha$  oraz stałej czasowej  $\tau$  modelu Cole-Cole dla przykładowych próbek izolacji celulozowo-olejowej w funkcji temperatury. W tabeli 7.1 zamieszczono wyniki obliczeń przykładowych wartości parametrów  $\alpha$  oraz stałej czasowej  $\tau$ .

Tabela 7.1. Przykładowe wartości parametrów  $\alpha$  oraz stałej czasowej  $\tau$  modelu Cole-Cole

Próbka 2C (termiczne starzenie papieru w 150°C o zawilgoceniu $w = 2\%$ )					
T [°C]	24°C	30°C	40°C	50°C	60°C
$\alpha$ [-]	0,388	0,359	0,335	0,315	0,309
$\tau$ [s]	2888,29	1415,54	635,39	454,38	356,25



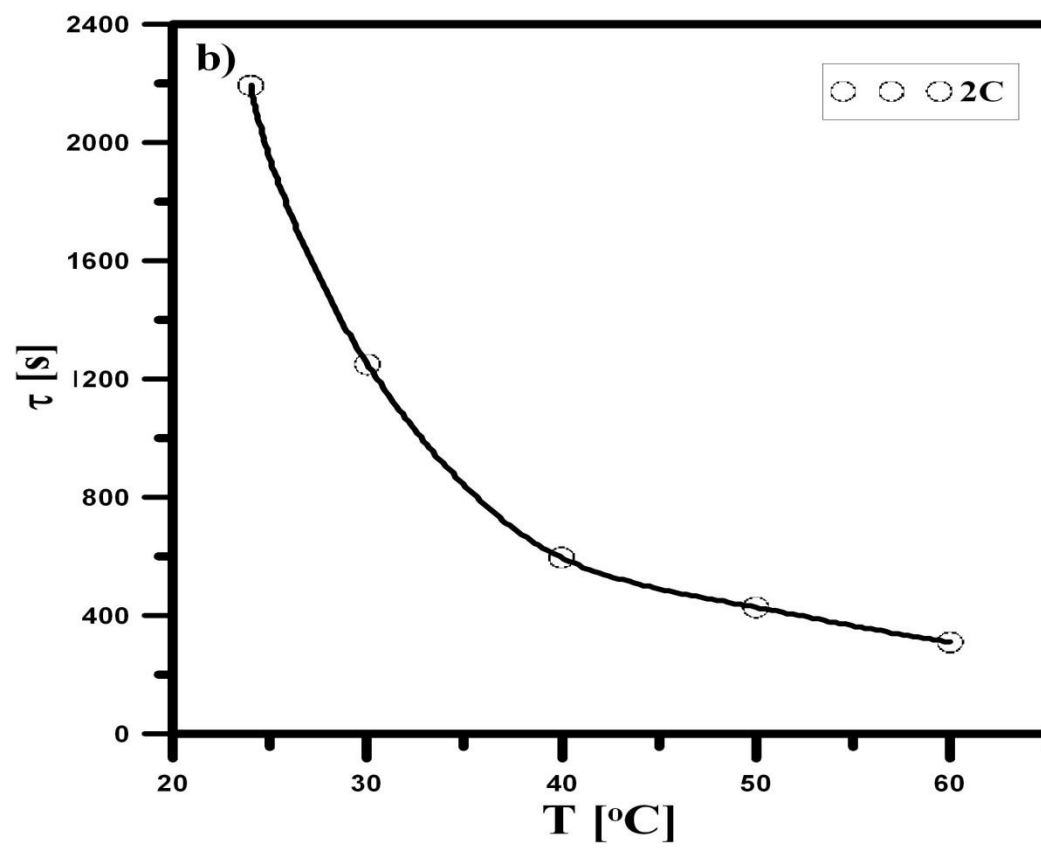
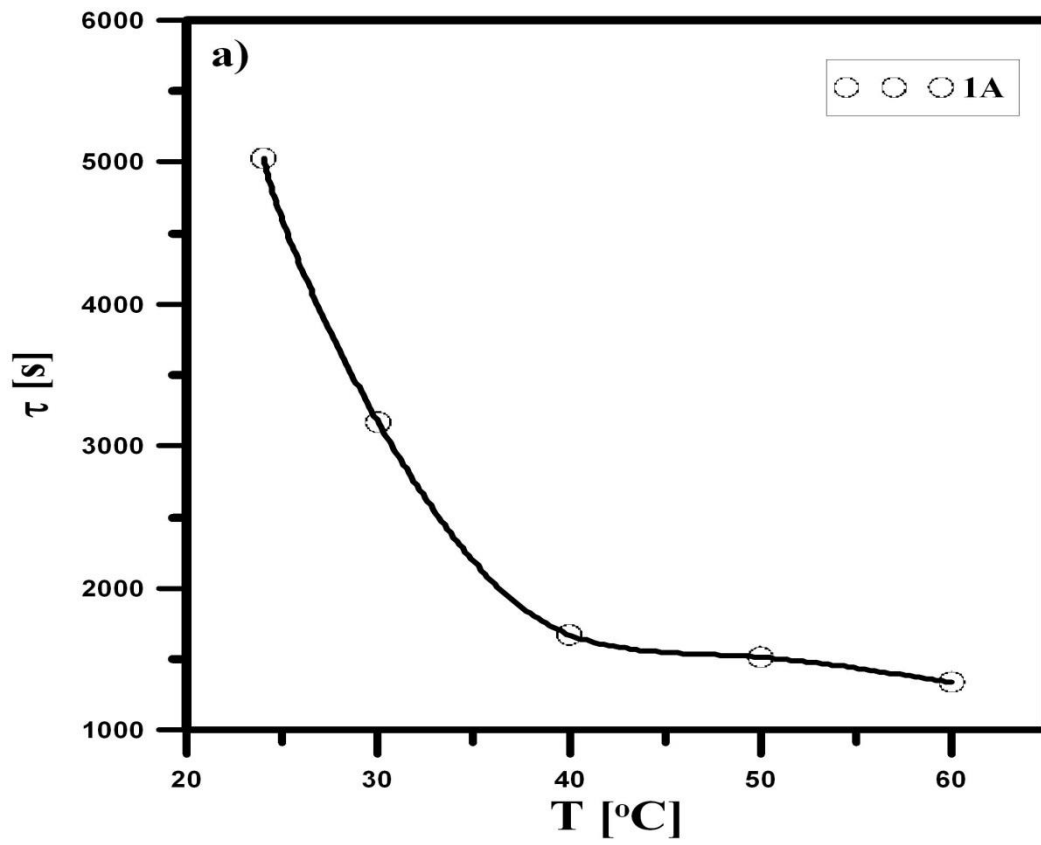


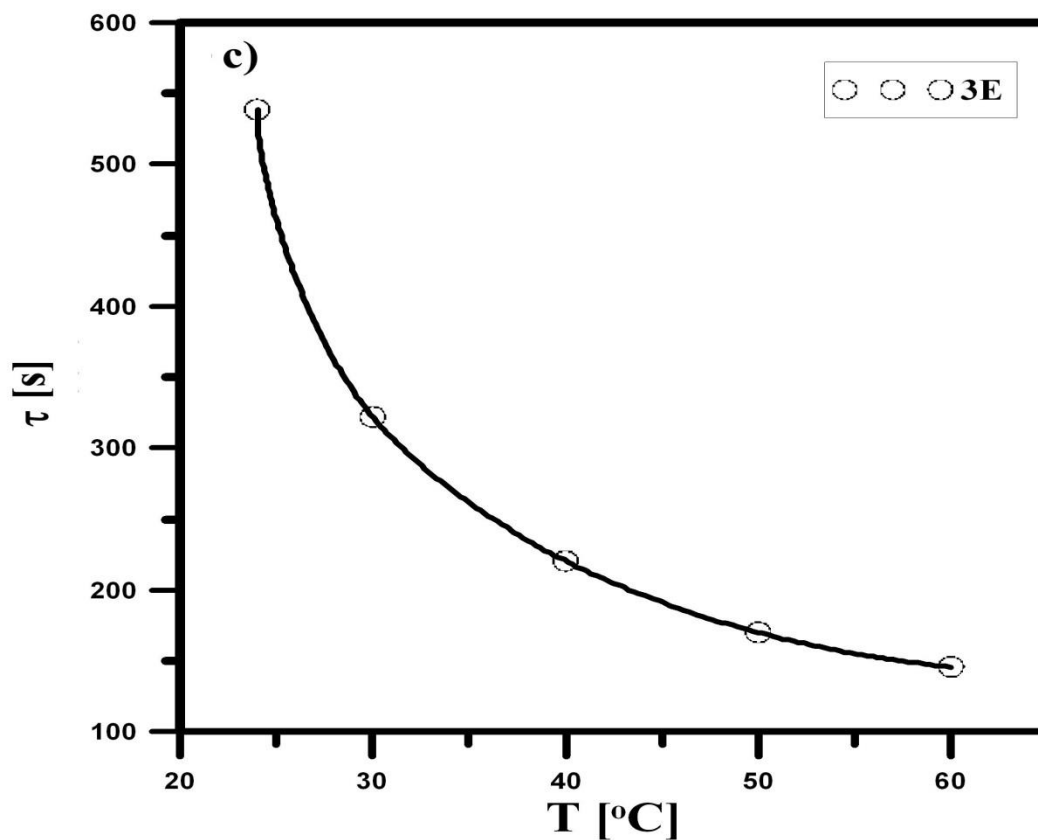


Rys. 7.5. Przykładowe charakterystyki parametru  $\alpha$  w funkcji temperatury,

- a – próbka 1A ( suszenie papieru w 120°C o zawilgoceniu w  $\leq 0,5\%$  ),
- b – próbka 2C ( termiczne starzenie papieru w 150°C o zawilgoceniu w = 2% ),
- c – próbka 3E ( termiczne starzenie papieru w 170°C o zawilgoceniu w = 4% ).

Na podstawie charakterystyk parametru  $\alpha$  modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej zaobserwowano, że pod wpływem rosnącej temperatury następuje niewielki spadek wartości parametr  $\alpha$ . Spowodowane to jest tym, że wartość parametru  $\alpha$  w znacznej mierze zależy od struktury cząstek dipolowych biorących udział w polaryzacji i z założenia powinna być mniej wrażliwa na zmiany temperatury. Takie założenia w pełni potwierdziły przeprowadzone badania oraz obliczenia. W przypadku pozostałych przygotowanych próbek, (zgodnie z tabelą 6.4) otrzymane wyniki oraz wnioski są identyczne.





Rys. 7.6. Przykładowe charakterystyki parametru  $\tau$  w funkcji temperatury,

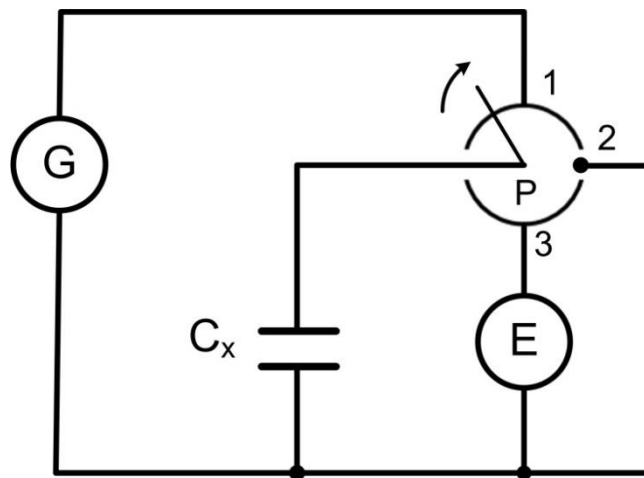
- a – próbka 1A ( suszenie papieru w 120°C o zawilgoceniu w  $\leq 0,5\%$  ),
- b – próbka 2C ( termiczne starzenie papieru w 150°C o zawilgoceniu w = 2% ),
- c – próbka 3E ( termiczne starzenie papieru w 170°C o zawilgoceniu w = 4% ).

W przypadku parametru  $\tau$  modelu Cole-Cole zaobserwowano, że wraz ze wzrostem temperatury następuje kilkukrotne zmniejszenie wartości tego parametru. Dzieje się tak, ponieważ wzrost temperatury przeszkadza w porządkowaniu dipoli oraz zwiększa chaos, a co za tym idzie zmniejsza się wartość stałej czasowej  $\tau$ . Takie wnioski również wyciągnięto w przypadku pozostałych próbek izolacji celulozowo-olejowej (tabela 6.4).

### 7.3 Analiza symulacyjna charakterystyki napięcia powrotnego z wykorzystaniem schematu szeregowo-równoległego Cole-Cole

Celem przeprowadzonych badań była analiza oddziaływania temperatury na parametry schematu zastępczego izolacji celulozowo-olejowej wyznaczonego w oparciu o model Cole-Cole. Analizę przeprowadzono na drodze symulacji komputerowej, wykorzystując w tym zakresie metodę napięcia powrotnego RVM [23, 64, 83, 108].

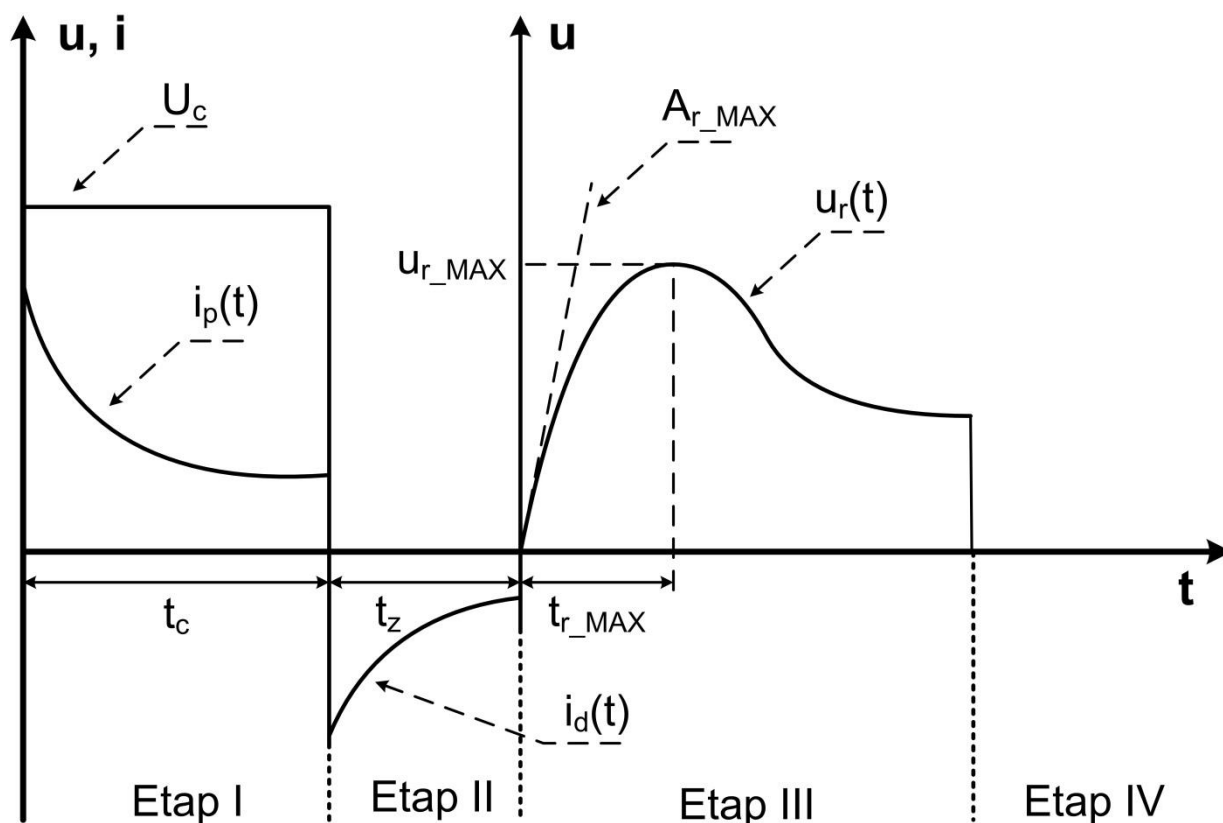
Na rysunku 7.7 przedstawiono uproszczony schemat układu do pomiaru napięcia powrotnego. Cykl pomiarowy metodą RVM podzielony jest na cztery etapy. Pierwszy etap rozpoczyna się ładowaniem badanej próbki napięciem stałym (pozycja 1) następnie po ustawieniu przełącznika w pozycję 2 (etap 2) odbywa się zwarcie próbki na krótki czas. Trzeci etap rozpoczyna się w momencie ustawienia pozycji 3 na przełączniku i rejestracji zmian napięcia powrotnego w czasie za pomocą elektrometru. Ostatni, czwarty etap cyklu pomiarowego polega na całkowitym rozładowaniu próbki izolacji celulozowo-olejowej (pozycja 2) [138].



Rys. 7.7. Schemat układu do pomiaru napięcia powrotnego metodą RVM [148]

G – zasilacz napięcia stałego,  $C_x$  – badany obiekt, E – miernik napięcia stałego, P – przełącznik

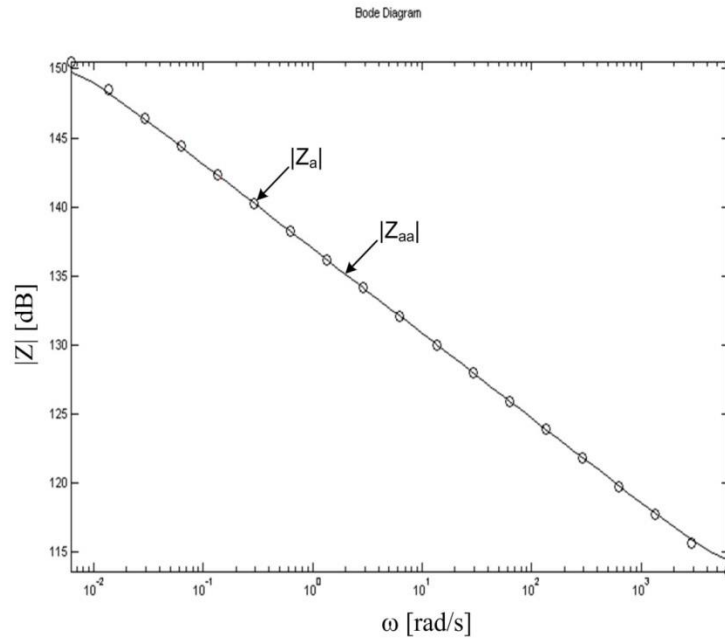
Natomiast rysunek 7.8 przedstawia przebiegi czasowe prądów i napięć, jakie występują podczas wykonywania diagnostyki metodą RVM. Kształt charakterystyki  $u_{r\_MAX}(t_c)$  jest bardzo czuły na stopień zawilgocenia oraz zestarzenia izolacji celulozowo-olejowej [108, 134].



Rys. 7.8. Przebiegi czasowe prądów i napięć jakie występują podczas wykonywania diagnostyki stanu izolacji metodą RVM [24, 64, 138]

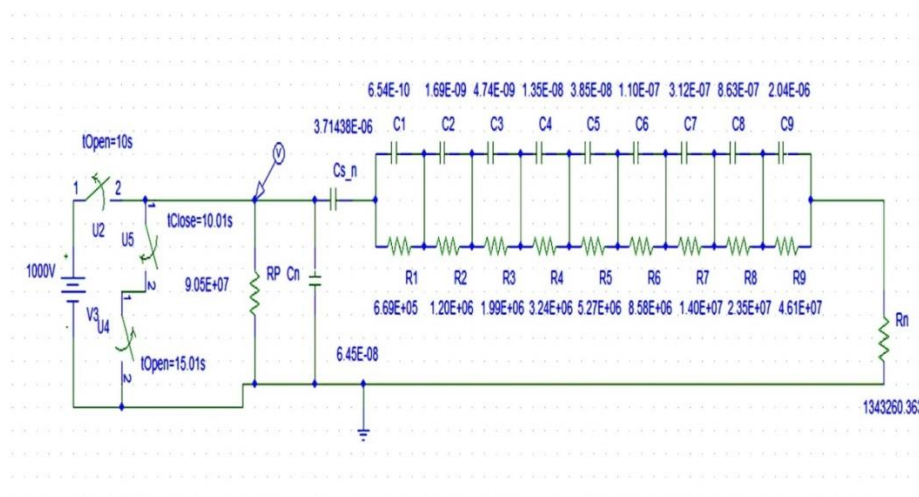
$U_c$  – napięcie ładowania,  $t_c$  – czas ładowania,  $t_z$  – czas zwarcia,  $t_{r\_MAX}$  – czas osiągnięcia maksimum napięcia powrotnego,  $U_{r\_MAX}$  – wartość maksymalna napięcia powrotnego,  $A_{r\_MAX}$  – współczynnik kierunkowy stycznej do czoła napięcia powrotnego,  $u_r(t)$  – napięcie powrotne,  $i_p(t)$  – prąd polaryzacji,  $i_d(t)$  – prąd depolaryzacji

Szeregowo-równoległy schemat zastępczy próbki izolacji celulozowo-olejowej według modelu Cole-Cole oraz sposób wyznaczenia parametrów tego schematu szczegółowo został opisany w rozdziale 5 pracy. Rysunek 7.9 przedstawia przykład zastosowania metody aproksymacji ziarnistej dla próbki 2D (termiczne starzenie papieru w  $150^\circ\text{C}$  o zawilgoceniu  $w = 3\%$ ) izolacji celulozowo-olejowej w temperaturze  $50^\circ\text{C}$ .



Rys. 7.9. Wynik zastosowania metody aproksymacji ziarnistej impedancji charakterystycznej  $Z_a$  dla przykładowej próbki 2D (termiczne starzenie papieru w  $150^\circ\text{C}$  o zawilgoceniu w = 3%).

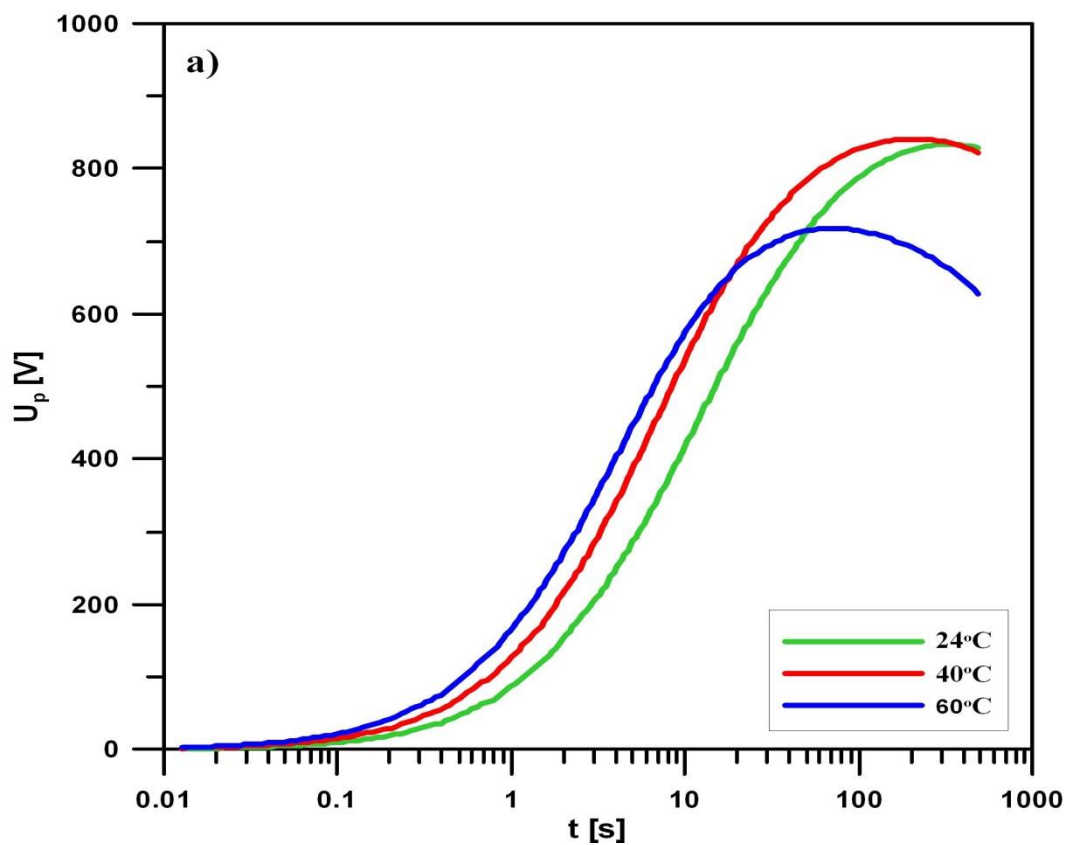
Ostatecznie po wyznaczeniu elementów RC schematu zastępczego według modelu Cole-Cole można zaprojektować układ. W tym celu posłużono się programem PSpices Schematics [73, 96, 154], na którym wykonano symulację komputerową napięcia powrotnego metodą RVM. Na rysunku 7.10 przedstawiono przykładowy schemat próbki izolacji celulozowo-olejowej.



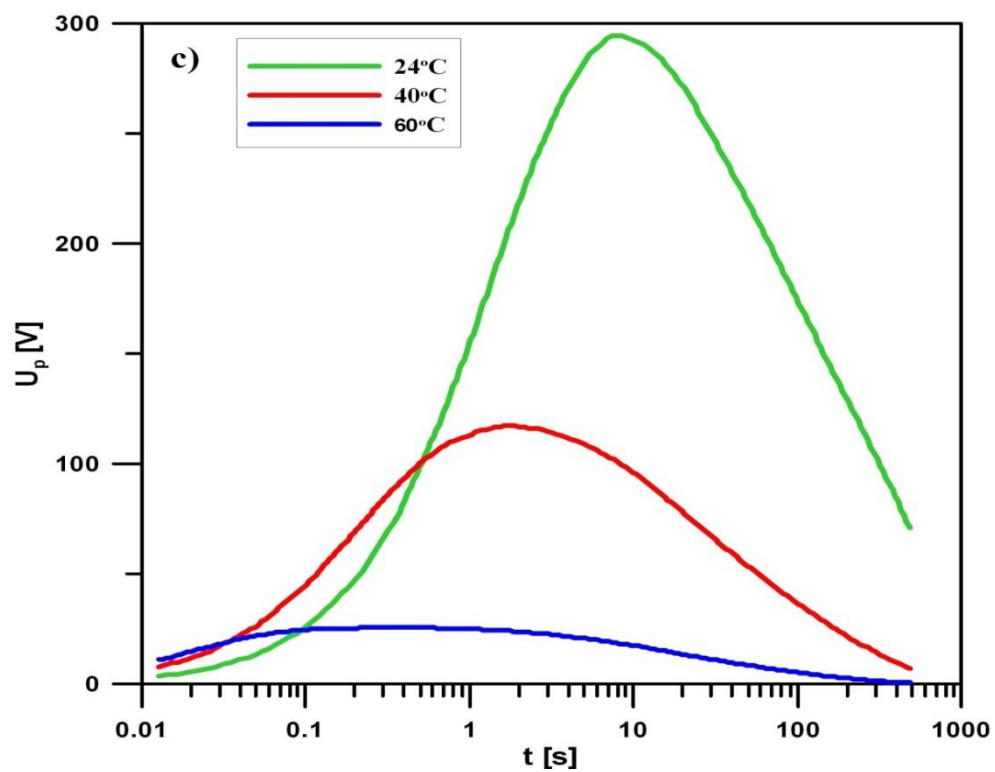
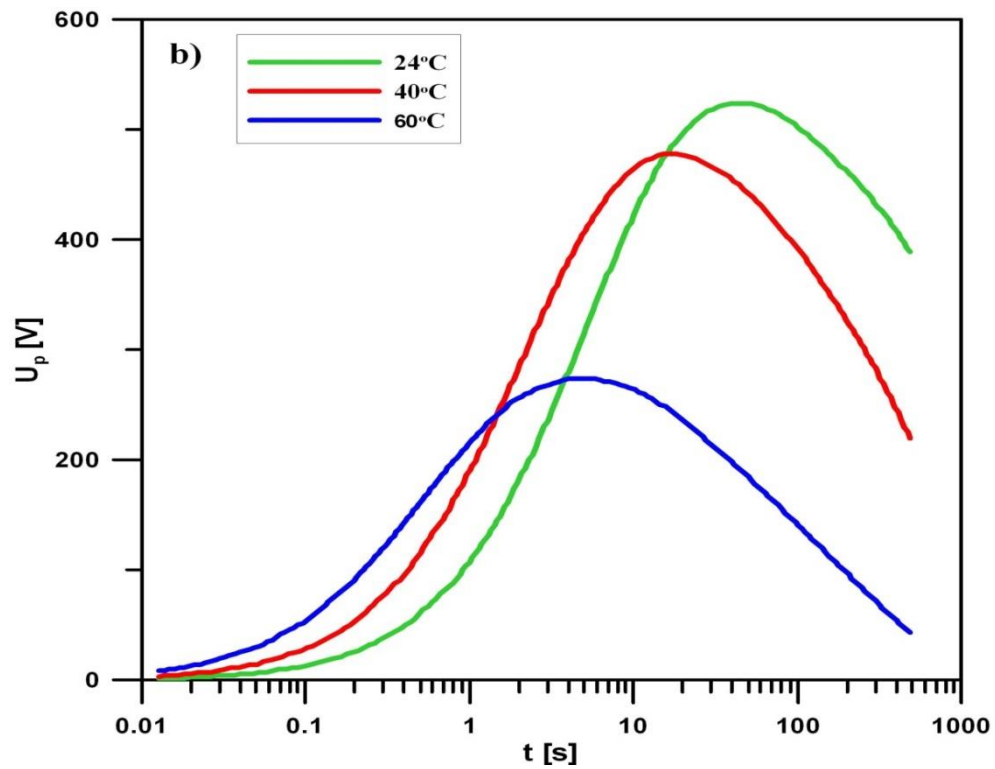
Rys. 7.10. Zaprojektowany w programie PSpices Schematics przykładowy szeregowo-równoległy schemat zastępczy próbki izolacji celulozowo-olejowej

W celu określenia wpływu temperatury na parametry schematu zastępczego izolacji celulozowo-olejowej została wykonana analiza napięcia powrotnego metodą RVM dla przykładowo dobranego czasu ładowania 10 s oraz czasu zwarcia 5 s.

Rysunek 7.11 przedstawia przykładowe charakterystyki napięcia powrotnego, otrzymane na drodze symulacji komputerowej przy wykorzystaniu schematów zastępczych.







Rys. 7.11. Przykładowe charakterystyki napięcia powrotnego  $U_p$  w funkcji temperatury,  
 a – próbka 1A ( suszenie papieru w 120°C o zawilgoceniu  $w \leq 0,5\%$  ),  
 b – próbka 2C ( termiczne starzenie papieru w 150°C o zawilgoceniu  $w = 2\%$  ),  
 c – próbka 3E ( termiczne starzenie papieru w 170°C o zawilgoceniu  $w = 4\%$  ).

Analizując charakterystyki napięcia powrotnego pokazane na rysunku 7.11 zaobserwowano przesuwanie się „czoła” charakterystyk w stronę czasów krótszych w miarę wzrostu temperatury. Przyczyną tego jest wzrost przewodności skrośnej próbek w wyniku wzrastającej temperatury. Kolejnym efektem rosnącej temperatury badanej próbki jest obniżanie się maksimów napięcia powrotnego. Takie same wnioski dotyczą pozostałych przebadanych próbek (tabela 6.4) Poczynione obserwacje dowodzą poprawności odpowiedzi napięciowej badanych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej.

Przeprowadzone badania i obliczenia wykazały przydatność stosowania zastępczego schematu szeregowo-równoległy wyznaczonego z modelu Cole-Cole izolacji celulozowo-olejowej do oceny wpływu temperatury.

#### **7.4 Podsumowanie wyników eksperymentalnych i symulacyjnych**

Wykorzystując metodę spektroskopii częstotliwościowej FDS dokonano oceny wpływu temperatury na parametry modelu Cole-Cole izolacji celulozowo-olejowej. Dokonano również analizy oddziaływania temperatury na parametry schematu zastępczego szeregowo-równoległego izolacji celulozowo-olejowej wyznaczonego w oparciu o model Cole-Cole.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono:

- wpływ temperatury powoduje wzrost współczynnika stratności  $\tan\delta$ , co powoduje wzrost strat dielektrycznych próbek izolacji celulozowo-olejowej,
- wraz ze wzrostem temperatury rośnie również pojemność  $C$ , zwłaszcza przy częstotliwościach niższych tj.  $\leq 10^{-1}$  Hz,
- wzrost temperatury ma niewielki wpływ na wartość parametru  $\alpha$  modelu Cole-Cole, ponieważ wartość tego parametru w głównej mierze zależy od struktury cząstek dipolowych biorących udział w polaryzacji,
- zaobserwowano duży spadek wartości parametru  $\tau$  modelu Cole-Cole wraz ze wzrostem temperatury, gdyż wzrost temperatury przeszkadza w porządkowaniu dipoli skutkiem zjawiska polaryzacji, zwiększając tym samym chaos,
- zauważono przesuwanie się „czoła” charakterystyk napięcia powrotnego w miarę wzrostu temperatury, ponieważ wzrost temperatury powoduje wzrost przewodności skrośnej próbek izolacji celulozowo-olejowej,
- zauważono obniżanie się maksimów napięcia powrotnego wraz ze wzrostem temperatury.

Na podstawie przeprowadzonych badań i obliczeń eksperymentalnych wykazano duży wpływ temperatury na parametry próbek izolacji celulozowo-olejowej. Otrzymane wyniki umożliwiają dokonanie analizy pod kątem ich przydatności w diagnostyce transformatorów energetycznych zważywszy, że zakres analizowanych temperatur odpowiadał wartościom spotykanym w eksploatacji jednostek transformatorowych.

Powyższe obserwacje pozwalają sądzić, że obrany kierunek badań umożliwi również ocenę wpływu zawilgocenia oraz zesterzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej. Ostatecznie uwzględnienie oddziaływania temperatury w diagnostyce izolacji celulozowo-olejowej wykorzystywanej metody FDS opartej na analizie parametrów Cole-Cole, będzie niezwykle istotne.

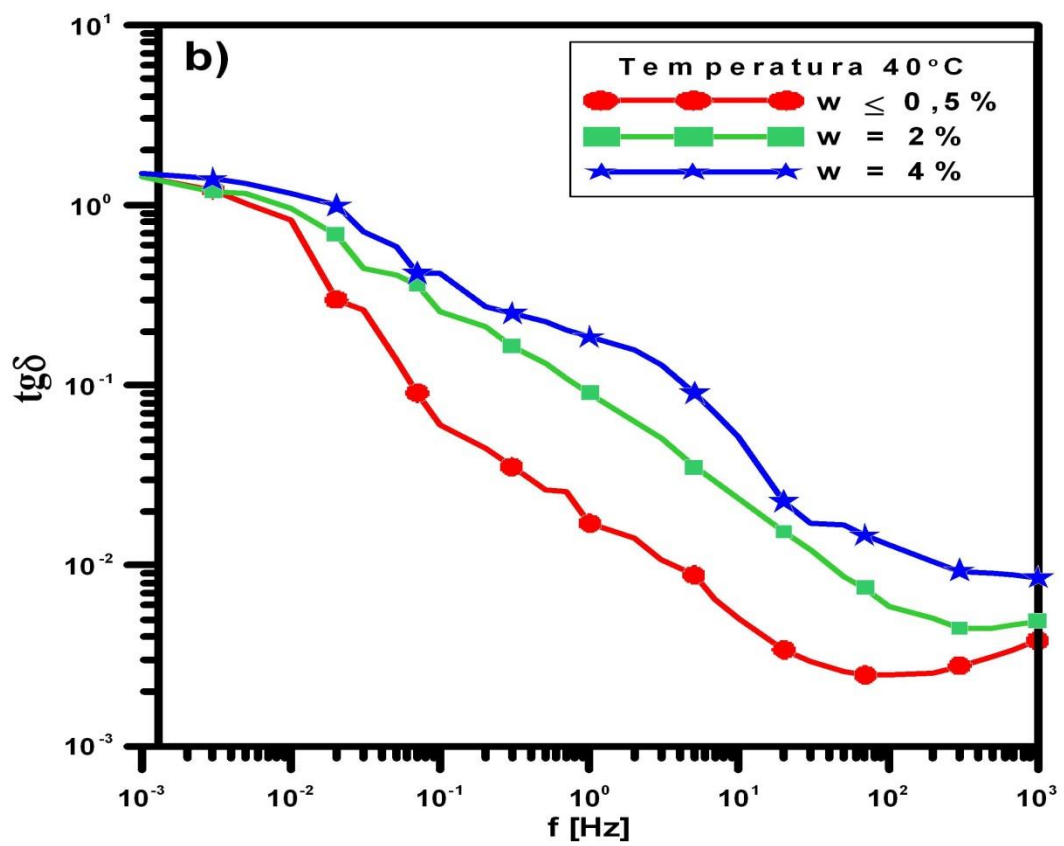
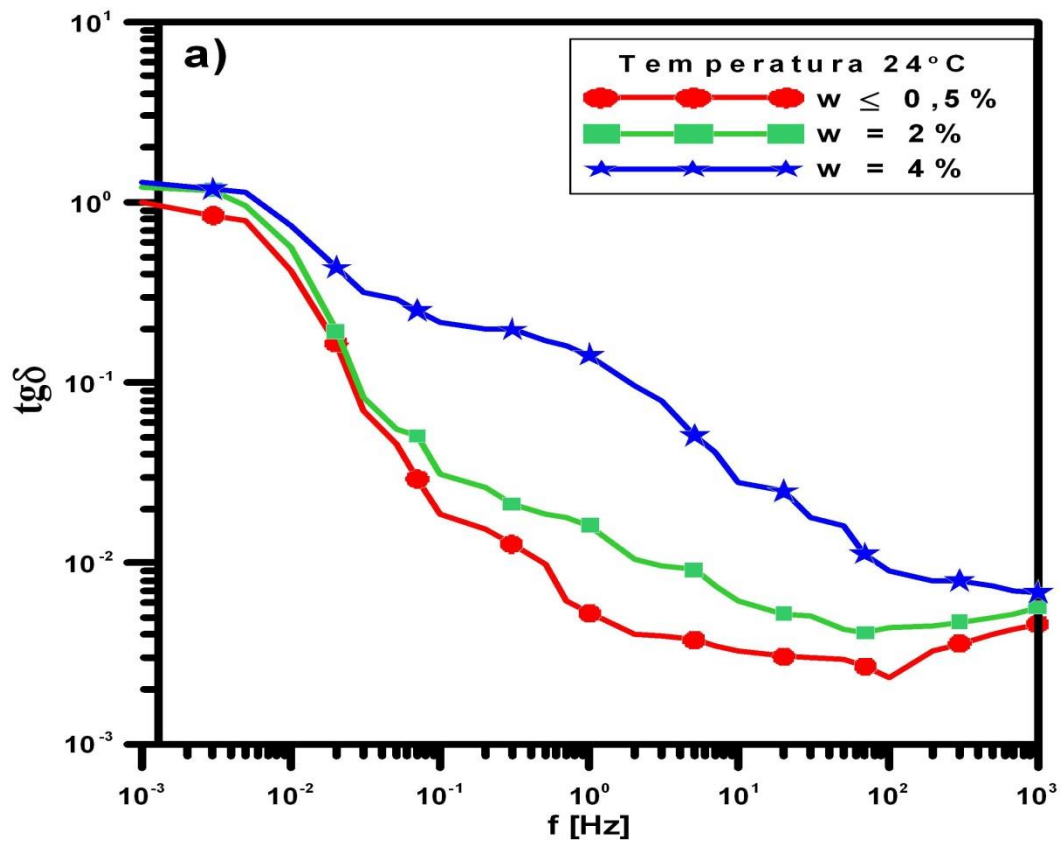
## **8. Analiza wpływu zawilgocenia na parametry modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej**

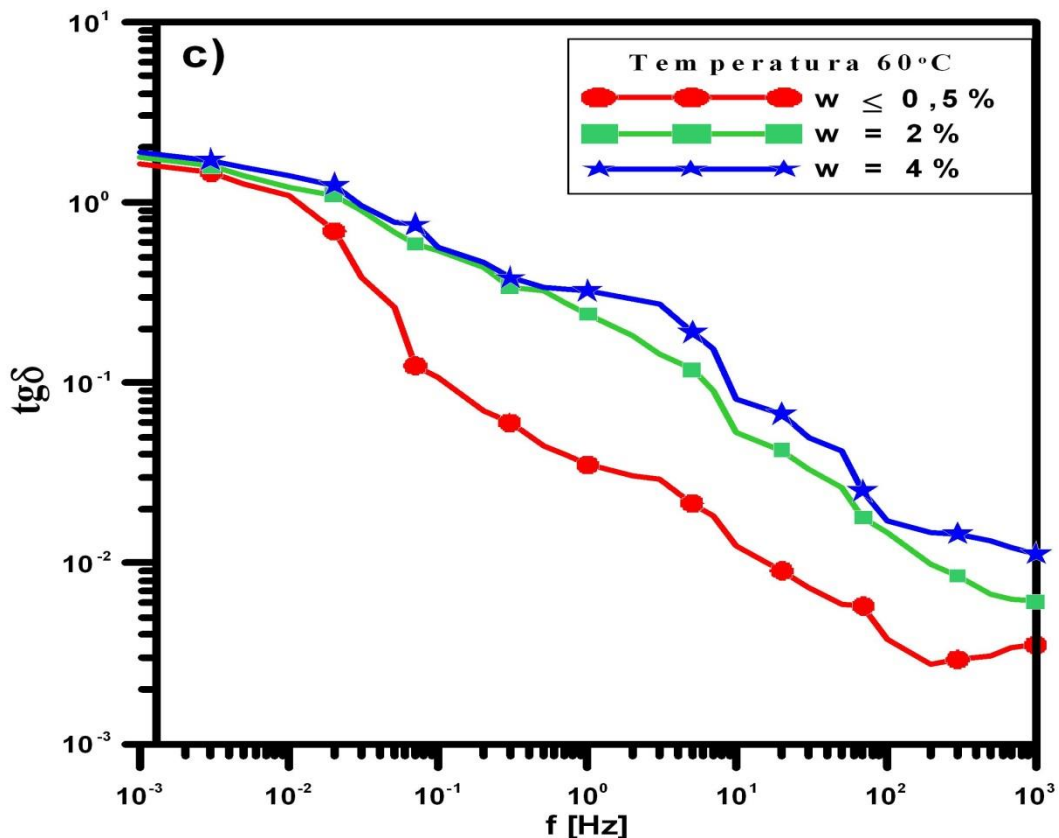
Celem badań eksperymentalnych było określenie wpływu zawilgocenia na parametry modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej w oparciu o pomiary wykonywane metodą spektroskopii częstotliwościowej FDS. Na podstawie otrzymanych wyników dokonano analizy pod kątem ich przydatności w przyszłej diagnostyce transformatorów energetycznych.

### **8.1 Charakterystyki dyspersyjne współczynnika stratności $tg\delta$ i pojemności C**

Eksperymentalne badania laboratoryjne wykonane metodą FDS pozwoliły na wyznaczenie charakterystyk dyspersyjnych współczynnika stratności  $tg\delta$  i pojemności C próbek izolacji celulozowo-olejowej. Procedurę pomiarową oraz wykorzystany w czasie pomiarów metodą FDS laboratoryjny układ pomiarowy został dokładnie opisany w podrozdziale 6.1 niniejszej pracy. Badania przeprowadzono na odpowiednio wcześniej przygotowanych próbkach, których przygotowanie i oznaczenie zostało opisane w podrozdziale 6.2. Stopień polimeryzacji papieru elektrotechnicznego (DP) użytego w czasie badań oszacowano wykorzystując dane zaczerpnięte z literatury [62, 91]. Starzenie termiczne tego typu papieru elektrotechnicznego dla przyjętych oznaczeń stopnia zesterzenia tzn. 1, 2, 3, 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 [62, 89, 91].

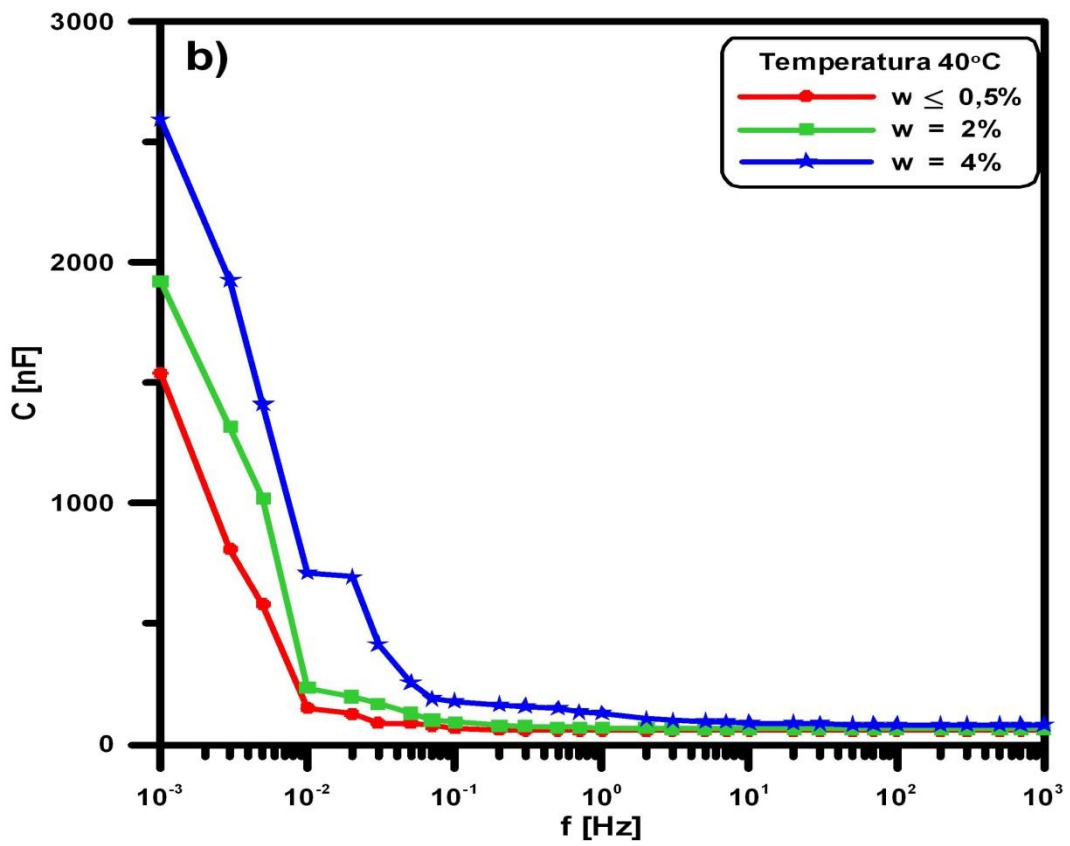
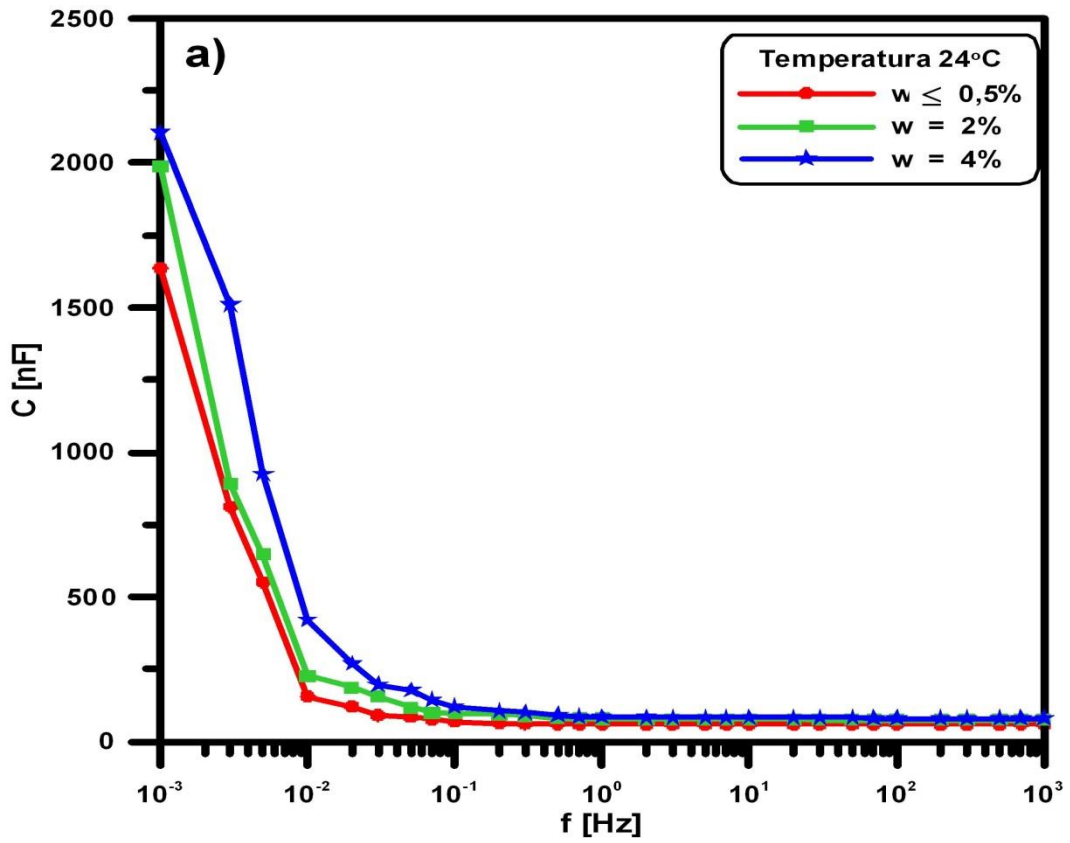
Na rysunku 8.1 pokazano przykładowe charakterystyki współczynnika stratności  $tg\delta(f)$ , natomiast na rysunku 8.2 przykładowe charakterystyki pojemności  $C(f)$ , dla próbek izolacji celulozowo-olejowej o różnym stopniu zesterzenia wraz z uwzględnieniem oddziaływania temperatury. Na charakterystykach przedstawiono oddziaływanie wpływu zawilgocenia izolacji, uwzględniając najniższe, średnie oraz najwyższe zawilgocenie próbek.

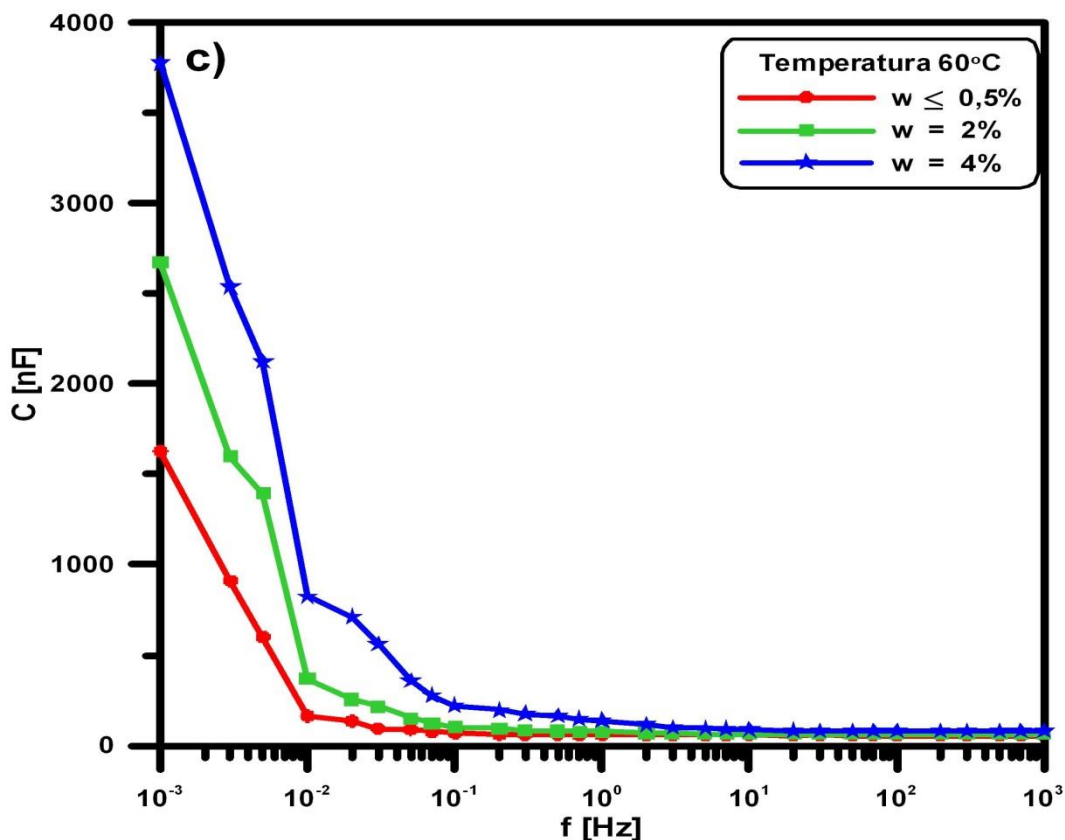




Rys. 8.1. Przykładowe charakterystyki współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  w funkcji zawilgocenia,  
 a – próbka 1 ( suszenie papieru w 120°C, pomiar w 24°C),  
 b – próbka 2 ( termiczne starzenie papieru w 150°C, pomiar w 40°C),  
 c – próbka 3 ( termiczne starzenie papieru w 170°C, pomiar w 60°C).

Na podstawie otrzymanych charakterystyk dyspersyjnych współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  w funkcji zawilgocenia zaobserwowano, że w miarę zwiększania się ilości wody w próbce, podobnie jak w przypadku wpływu temperatury następuj wzrost wartości tego współczynnika. W związku z tym straty dielektryczne próbek izolacji celulozowo-olejowej rosną wraz ze wzrostem zawilgocenia próbki. Podobne rezultaty uzyskano dla wszystkich pozostałych przebadanych próbek ujętych w tabeli 6.4. ze strony 51. Jednakże, precyzyjne określenie stopnia zawilgocenia izolacji celulozowo-olejowej jedynie w oparciu o pobieżną analizę charakterystyk  $\text{tg}\delta$  uzyskanych z metody FDS jest praktycznie niemożliwe. W tym celu stosuje się analizę porównawczą charakterystyki  $\text{tg}\delta$  otrzymanej wynikiem przeprowadzonego badania z charakterystykami  $\text{tg}\delta$  z bazy danych, która uwzględnia znany stopień zawilgocenia i temperatury eksperymentu. W przypadku diagnostyki stopnia zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych, taką analizę porównawczą umożliwiają elektryczne schematy zastępcze izolacji głównej transformatora.





Rys. 8.2. Przykładowe charakterystyki pojemności C w funkcji zawilgocenia,

- a – próbka 1 ( suszenie papieru w 120°C, pomiar w 24°C),
- b – próbka 2 ( termiczne starzenie papieru w 150°C, pomiar w 40°C),
- c – próbka 3 ( termiczne starzenie papieru w 170°C, pomiar w 60°C).

Przedstawione przykładowe charakterystyki dyspersyjne pojemności C (rys.8.2) próbek izolacji celulozowo-olejowej umożliwiają dokonanie oceny wpływu zawilgocenia na izolację. Powyższy przykład ilustruje, że w miarę zwiększania się ilości wody w próbkach izolacji następuje duży wzrost pojemności. Wzrost ten następuje przy częstotliwościach niższych tzn. ok. 10<sup>-1</sup> Hz tak jak w przypadku wpływu temperatury na próbkę izolacji celulozowo-olejowej. Na charakterystykach widzimy ponadto, że wzrost wartości pojemności następuję niezależnie od próbki, tzn. stopnia jej zesterzenia oraz temperatury pomiaru. Przebadane wszystkie pozostałe próbki (zgodnie z tabelą 6.4) wykazują analogiczne właściwości. Przyczynę obserwowanego zjawiska upatrywać można w znacznej polarności cząstek wody, które zwiększają wartość rzeczywistej składowej przenikalności  $\epsilon'$  izolacji, szczególnie w zakresach niskich częstotliwości, tj.:  $\leq 10^{-1}$  Hz.



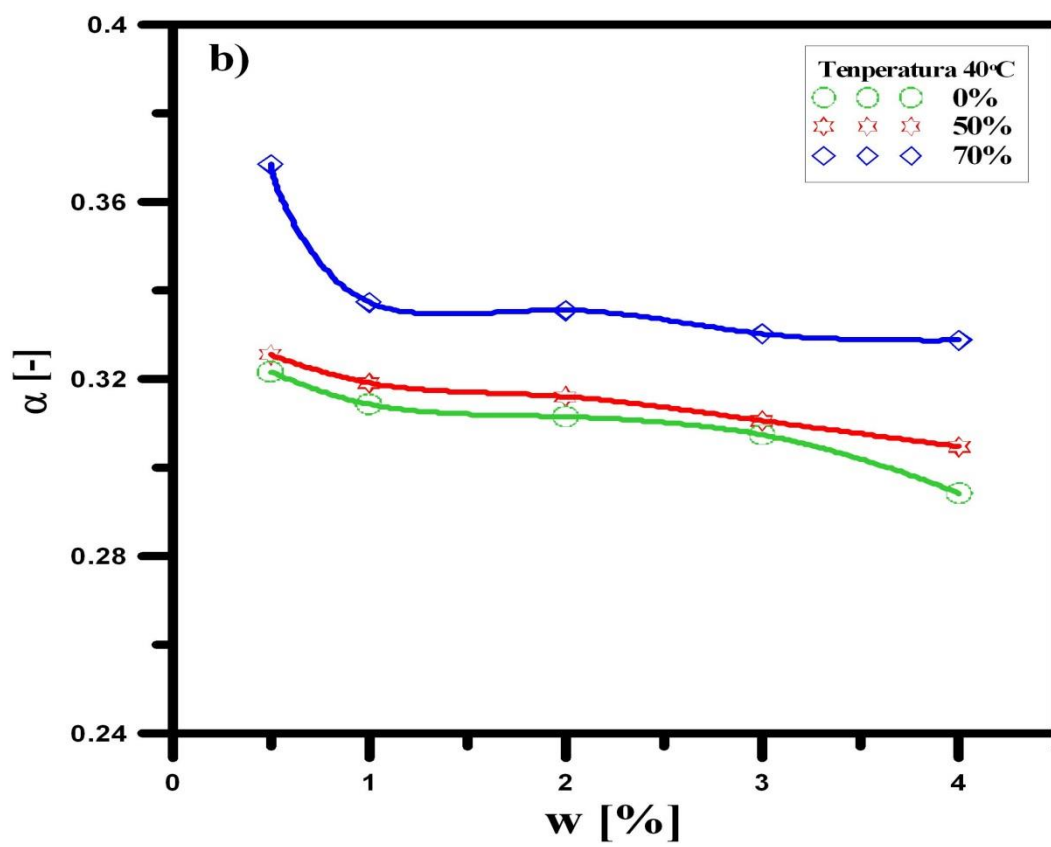
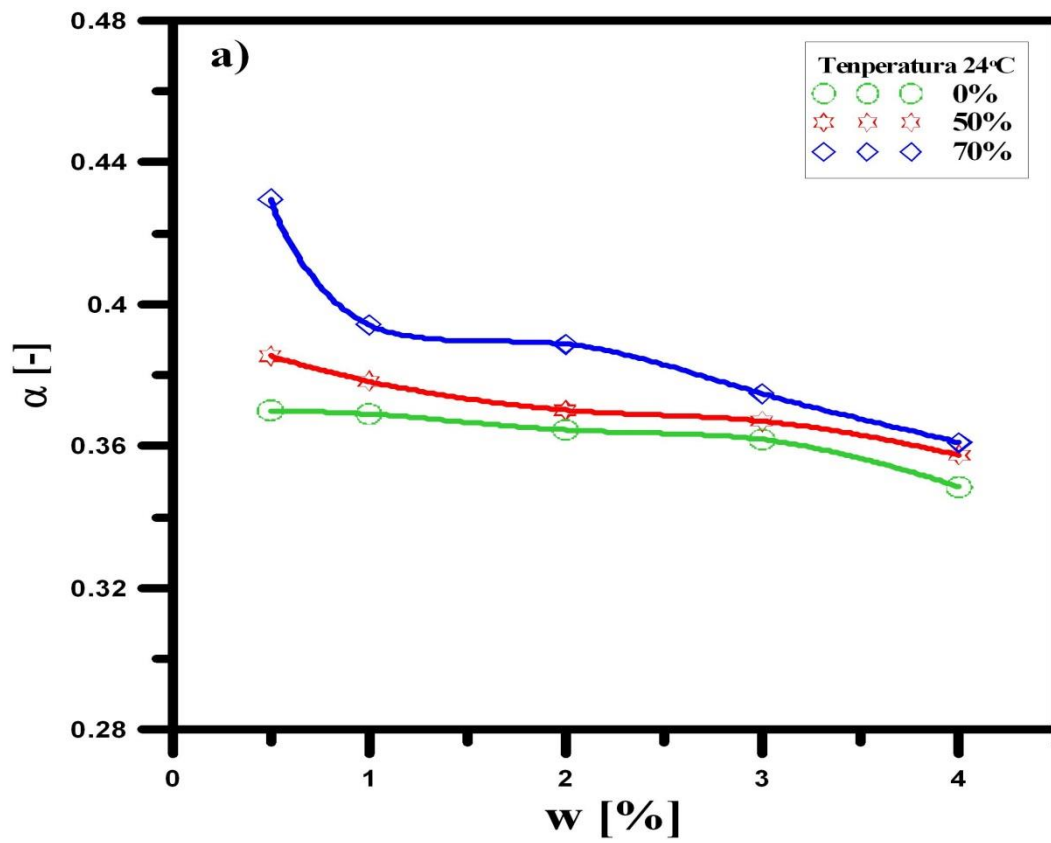
## 8.2 Charakterystyki parametrów $\alpha$ oraz $\tau$ modelu Cole-Cole

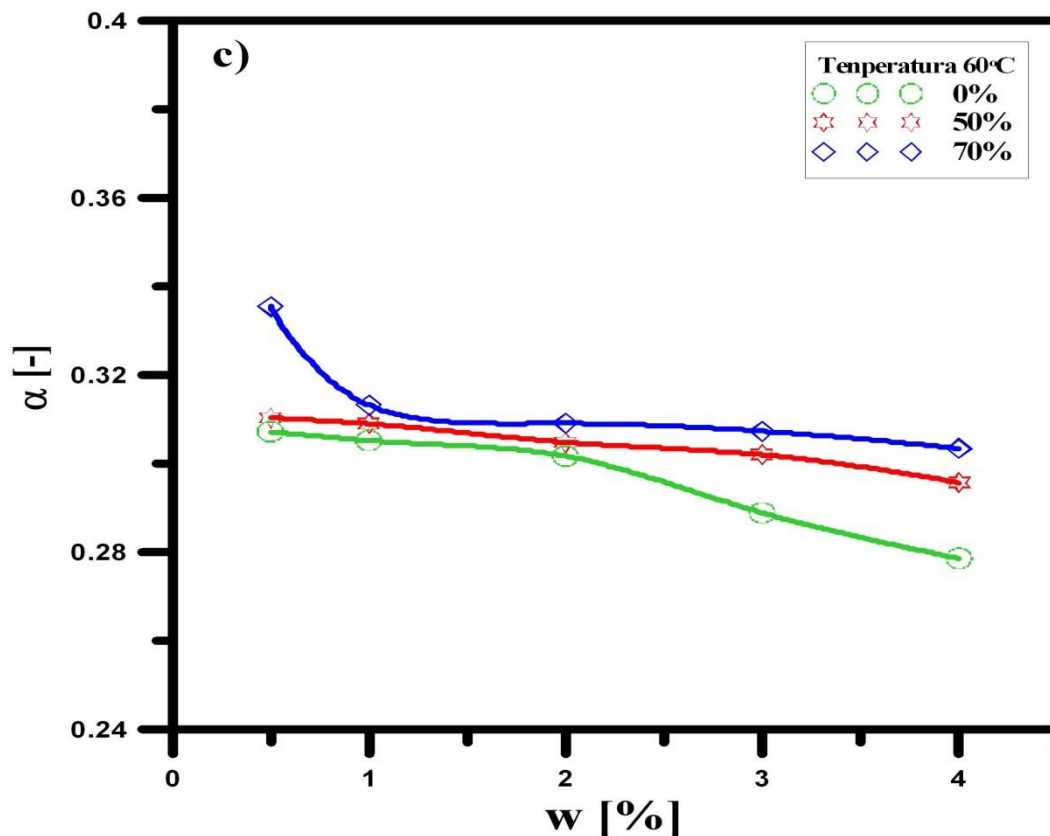
Wartości zespolonej przenikalności ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ), stałą czasową  $\tau$  oraz współczynnik  $\alpha$  modelu Cole-Cole wyznaczono na podstawie pomiarów eksperymentalnych metodą FDS. Parametry te obliczono analogicznie jak w podrozdziale 7.2, tzn. wykorzystując wzory z rozdziału 5 (tj. 5.12, (5.13), (5.14), (5.15), (5.16)). Przykładowy wykres zespolonej przenikalności ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) modelu Cole-Cole, wyznaczony w oparciu o dane eksperymentalne pokazano na rysunku 7.3. Natomiast sposób wyznaczenia parametrów  $\alpha$  oraz  $\tau$  modelu Cole-Cole przykładowej próbki zilustrowano na rysunku 7.4.

Rysunki 8.3 i 8.4 przedstawiają odpowiednio charakterystyki współczynnika  $\alpha$  oraz stałej czasowej  $\tau$  modelu Cole-Cole dla przykładowych próbek izolacji celulozowo-olejowej w funkcji zawilgocenia. W tabeli 8.1 zamieszczono wyniki obliczeń przykładowych wartości parametrów  $\alpha$  oraz stałej czasowej  $\tau$ .

Tabela 8.1. Przykładowe wartości parametrów  $\alpha$  oraz stałej czasowej  $\tau$  modelu Cole-Cole

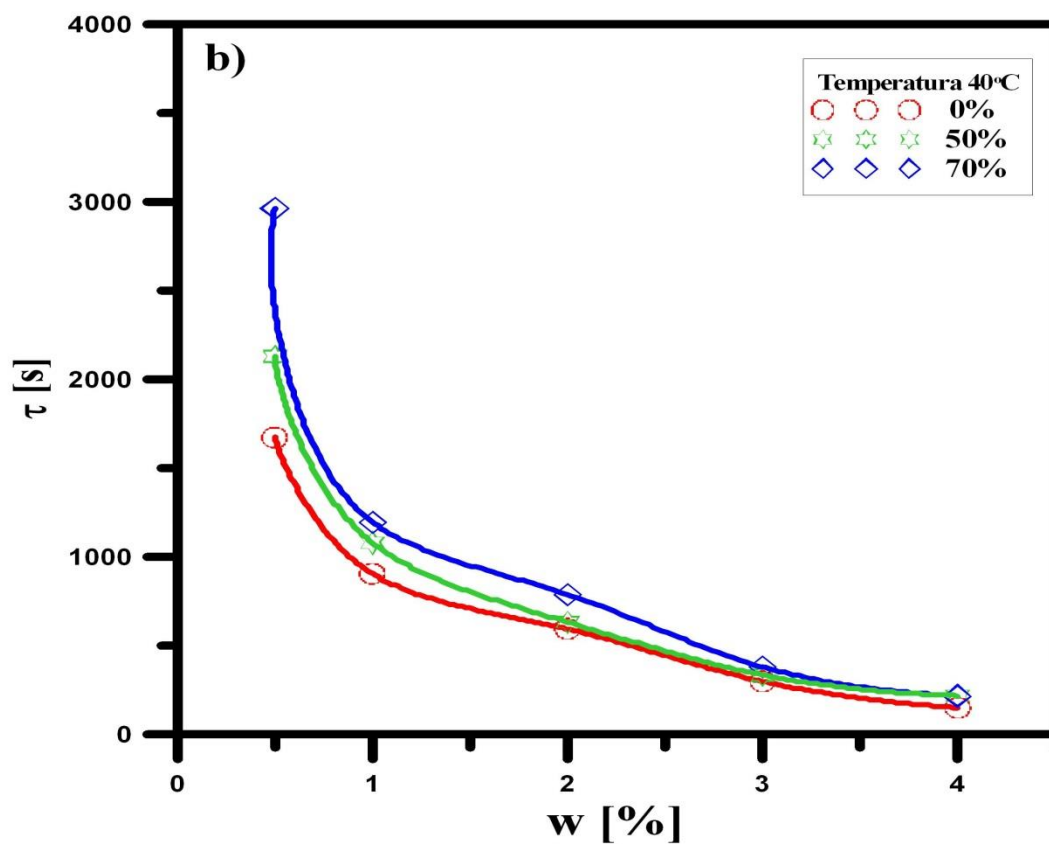
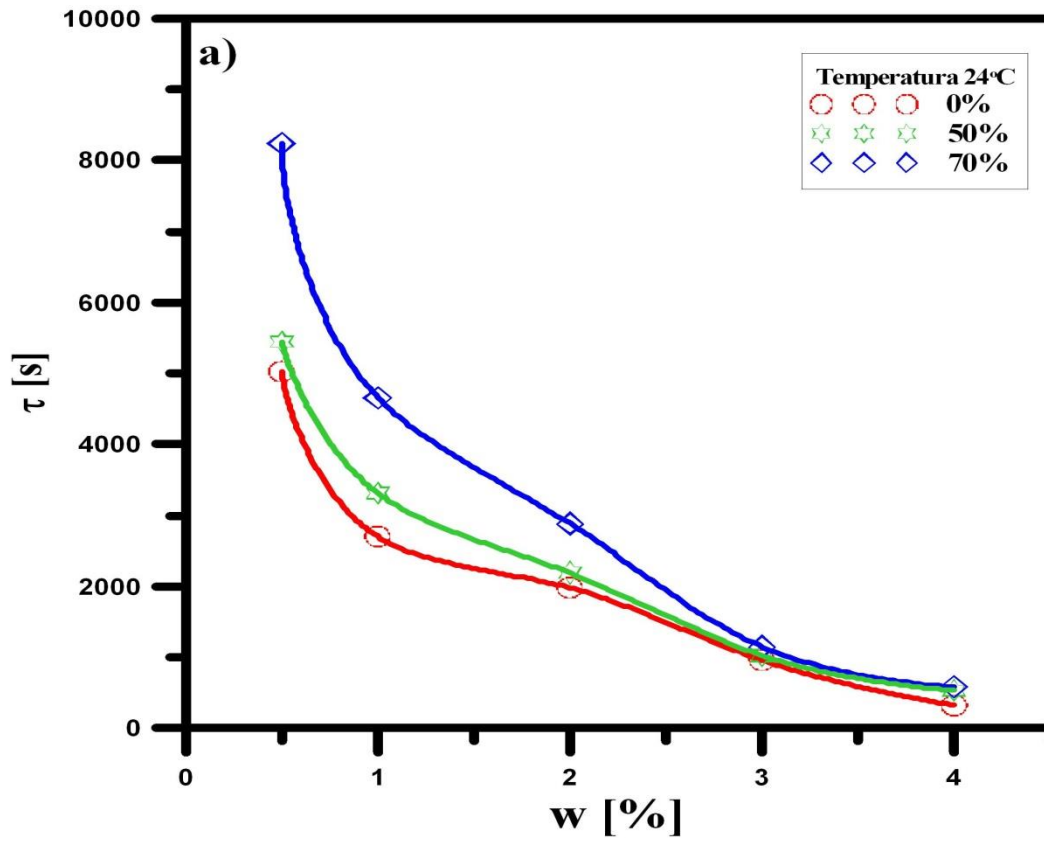
Temperatura pomiaru 24°C						
w	$\alpha$ [-]	$\alpha$ [-] (50%)	$\alpha$ [-] (70%)	$\tau$ [s]	$\tau$ [s] (50%)	$\tau$ [s] (70%)
$\leq 0,5\%$	0,370	0,385	0,429	5028,81	5448,48	8246,44
1%	0,369	0,378	0,394	2704,94	3318,02	4663,77
2%	0,364	0,370	0,388	1982,40	2192,76	2888,29
3%	0,361	0,367	0,374	1028,54	960,48	1104,37
4%	0,348	0,357	0,361	586,523	326,66	538,74

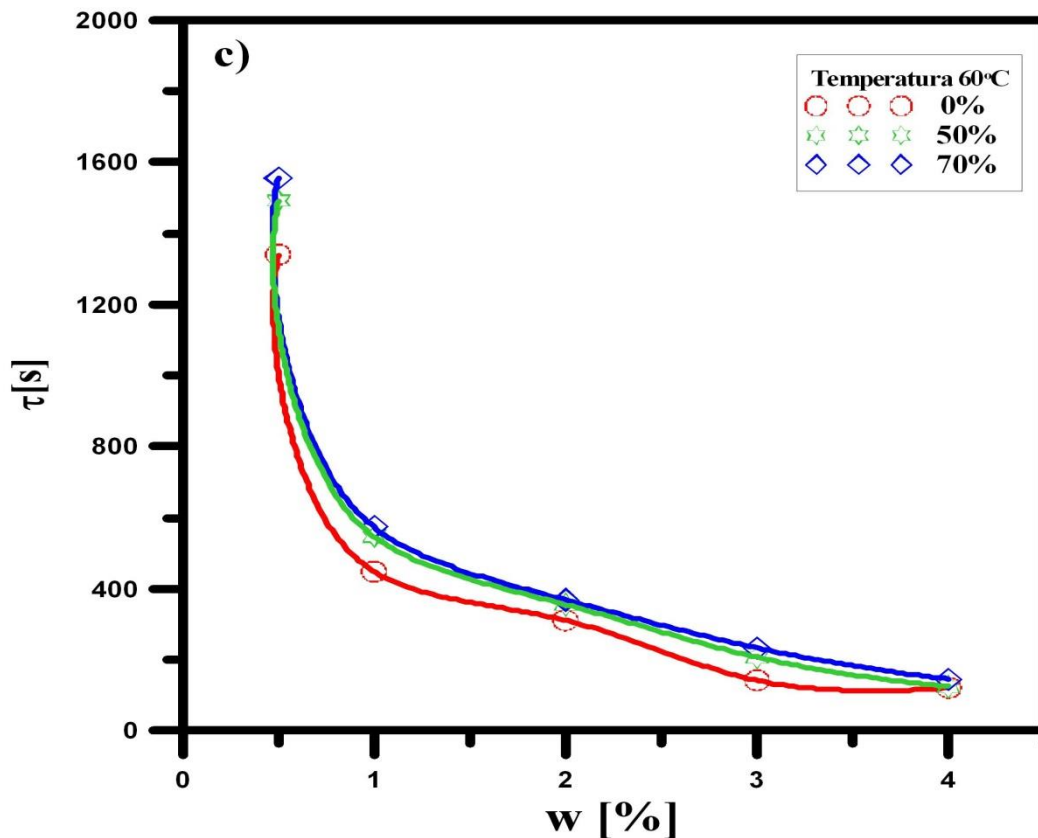




Rys. 8.3. Przykładowe charakterystyki parametru  $\alpha$  w funkcji zawilgocenia próbek izolacji,  
 a – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 24°C),  
 b – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 40°C),  
 c – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 60°C).

Analizując charakterystyki parametru  $\alpha$  modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej widać, że wraz ze zwiększaniem się ilości wody w próbkach następuje spadek wartości parametr  $\alpha$  niezależnie od stopnia zesterzenia próbki i temperatury pomiaru. Dzieje się tak dlatego, że wartość współczynnika  $\alpha$  modelu Cole-Cole zależy przede wszystkim od struktury cząsteczek dipolowych biorących udział w polaryzacji. W przypadku pozostałych przygotowanych próbek (zgodnie z tabelą 6.4), otrzymane wyniki oraz wnioski są identyczne. Jednakże obserwowane zmiany wartości parametru  $\alpha$  modelu Cole-Cole w funkcji zawilgocenia w ujęciu ilościowym są raczej niewielkie. Istotne jest również, że charakterystyki w żadnym punkcie pomiarowym się nie przecinają. Dokonana obserwacja jest o tyle ważna, że pozwala mieć nadzieję na opracowanie w przyszłości odpowiednich tabel współczynników poprawkowych parametru  $\alpha$ , które uwzględnią oddziaływanie stopnia zawilgocenia oraz temperatury. Daje to możliwość wykorzystania parametru  $\alpha$  do oceny stopnia zesterzenia izolacji, czego dowiedzie podrozdział 9.2 niniejszej pracy.





Rys. 8.4. Przykładowe charakterystyki parametru  $\tau$  w funkcji zawilgocenia próbek izolacji,  
 a – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 24°C),  
 b – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 40°C),  
 c – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 60°C).

W przypadku parametru  $\tau$  modelu Cole-Cole zaobserwowano, że wzrost stopnia zawilgocenia badanych próbek powoduje znaczny spadek wartości tego parametru niezależnie od temperatury pomiaru oraz stopnia degradacji termicznej próbki. Dzieje się tak, ponieważ rosnąca obecność wody w próbkach ze względu swą wysoką polarność, dominuje w spektrum relaksacji cząsteczek dipolowych. Takie wnioski również wyciągnięto w przypadku pozostałych przebadanych próbek izolacji celulozowo-olejowej (tabela 6.4 na stronie 51). Tym samym, stałą czasową  $\tau$  modelu Cole-Cole typować można jako parametr określający stopień zawilgocenia diagnozowanej próbki izolacji. Ważne jest również, że wpływ stopnia zesterzenia w ujęciu ilościowym jest raczej niewielki. W przyszłej diagnostyce ważne będzie natomiast uwzględnianie oddziaływania temperatury na stałą czasową  $\tau$ .

### **8.3 Analiza symulacyjna charakterystyki napięcia powrotnego z wykorzystaniem schematu szeregowo-równoległego Cole-Cole**

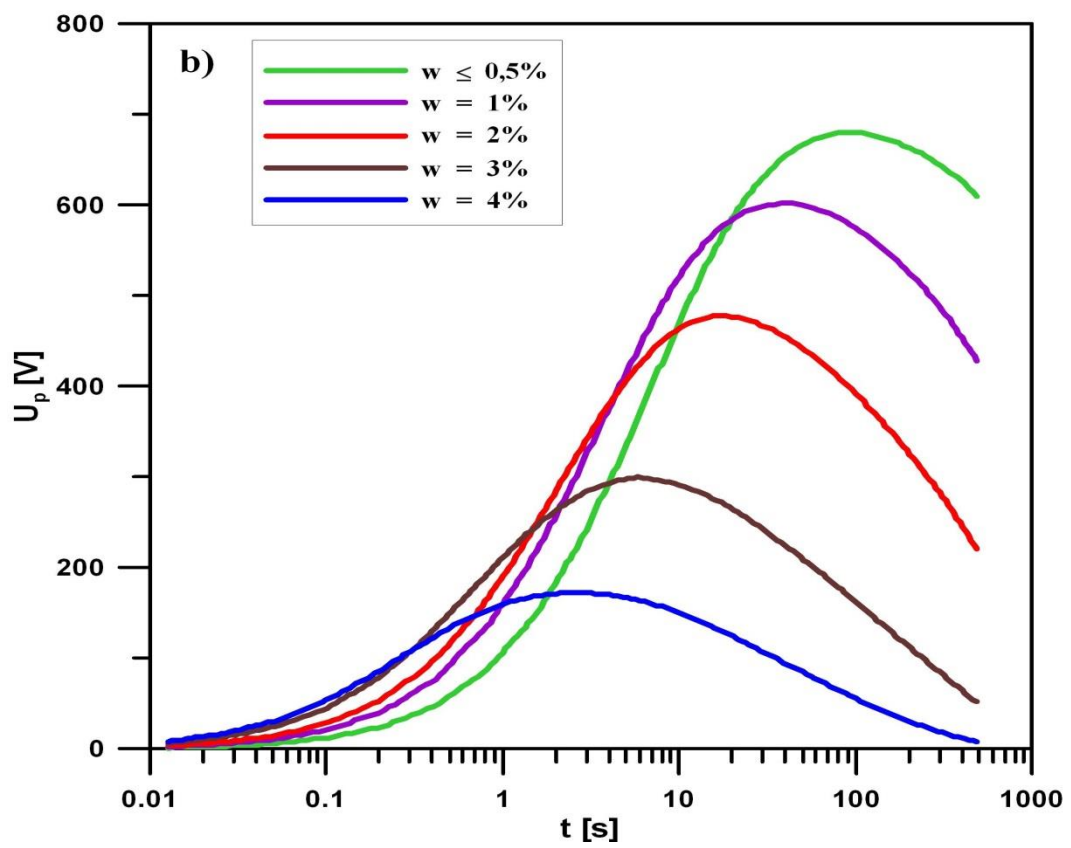
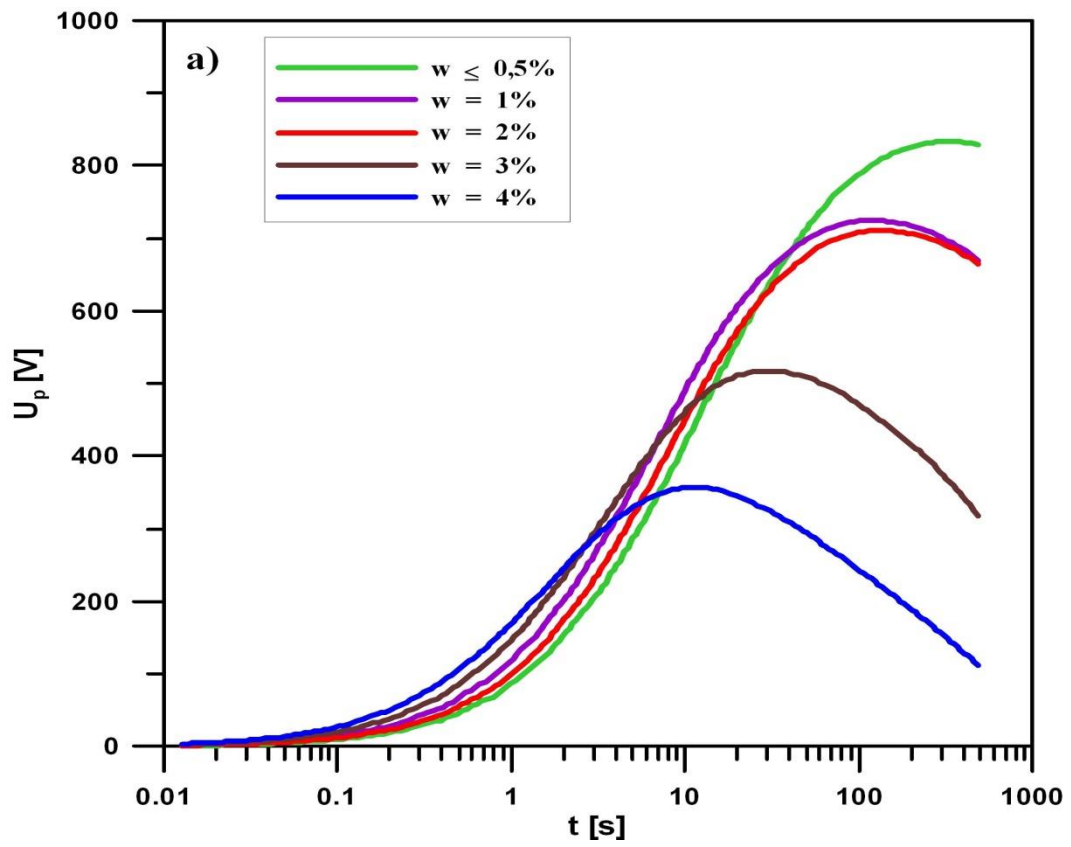
Analogicznie jak w podrozdziale 7.3 niniejszej pracy dokonano analizy oddziaływania stopnia zawilgocenie próbek izolacji na parametry schematu zastępczego izolacji celulozowo-olejowej wyznaczonego w oparciu o model Cole-Cole.

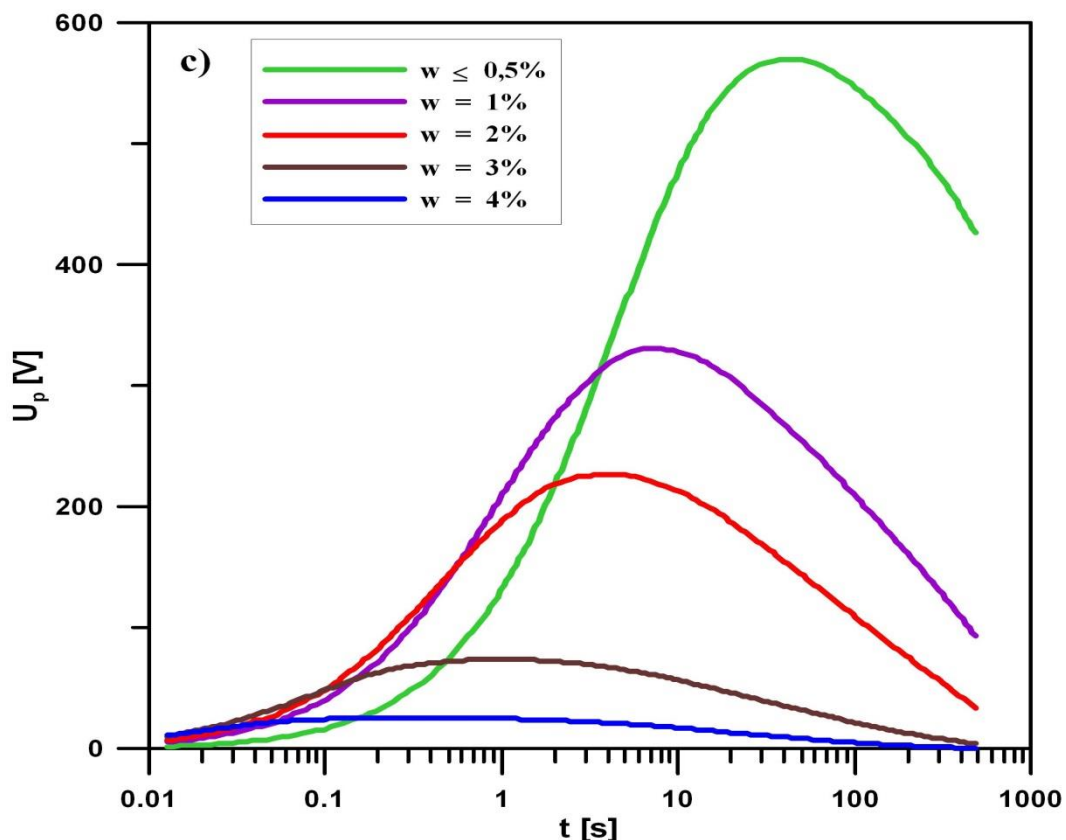
Szeregowo-równoległy schemat zastępczy próbki izolacji celulozowo-olejowej według modelu Cole-Cole oraz sposób wyznaczenia parametrów tego schematu szczegółowo został opisany w rozdziale 5 pracy. Na rysunku 7.7 pokazano przykładowe zastosowanie metody aproksymacji ziarnistej dla próbki izolacji celulozowo-olejowej.

Zaprojektowany schemat zastępczy według modelu Cole-Cole próbki izolacji celulozowo-olejowej, analogiczny jak na rys. 7.8, umożliwił wykonanie symulacji komputerowej napięcia powrotnego metodą RVM.

W celu określenia wpływu stopnia zawilgocenia próbek izolacji celulozowej na parametry schematu zastępczego izolacji wykonano jak w podrozdziale 7.3, analizę napięcia powrotnego metodą RVM dla przykładowo dobranego czasu ładowania 10 s oraz czasu zwarcia 5 s.

Rysunek 8.5 przedstawia przykładowe charakterystyki napięcia powrotnego, otrzymane na drodze symulacji komputerowej przy wykorzystaniu schematów zastępczych.





Rys. 8.5. Przykładowe charakterystyki napięcia powrotnego  $U_p$  w funkcji zawilgocenia próbek izolacji  
a – próbka nowa ( suszenie papieru w 120°C, pomiar w 24°C),  
b – utrata stopnia DP o 50% ( termiczne starzenie papieru w 150°C, pomiar w 40°C),  
c – utrata stopnia DP o 70% ( termiczne starzenie papieru w 170°C, pomiar w 60°C).

Na podstawie przykładowych charakterystyk napięcia powrotnego pokazanych na rysunku 8.5 zaobserwowano przesuwanie się maksimum charakterystyk w stronę czasów krótszych w miarę wzrostu stopnia zawilgocenia próbek. Powodem tego jest skracanie się czasów relaksacji dipolowych na skutek rosnącej obecności wody w próbce. Takie same wnioski dotyczą pozostałych przebadanych próbek (tabela 6.4). Wniosek ten jest typowy, jaki obserwuje się w diagnostyce praktycznej stopnia zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych wykonywanej metodą RVM [83, 145, 147].

Również i w tym przypadku wykonana analiza dowodzi poprawności odpowiedzi napięciowej badanych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej.

Jednocześnie, wykonane badania i obliczenia wykazały przydatność stosowania zastępczego schematu szeregowo-równoległy wyznaczonego z modelu Cole-Cole izolacji celulozowo-olejowej do oceny wpływu stopnia jej zawilgocenia.



## 8.4 Podsumowanie wyników eksperymentalnych i symulacyjnych

Wykorzystując metodę spektroskopii częstotliwościowej FDS dokonano oceny wpływu zawilgocenia na parametry modelu Cole-Cole izolacji celulozowo-olejowej. Dokonano również analizy oddziaływania zawilgocenia na parametry schematu zastępczego szeregowo-równoległego izolacji celulozowo-olejowej wyznaczonego w oparciu o model Cole-Cole.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono:

- współczynnik stratności  $\text{tg}\delta$  zależy od stopnia zawilgocenia próbki, rośnie wraz ze stopniem zawilgocenia próbek izolacji celulozowo-olejowej,
- pojemność  $C$  również jest uzależniona od poziomu zawartości wody w próbce,
- zwiększanie się ilości wody w próbkach powoduje spadek wartości parametru  $\alpha$ , ponieważ wartość współczynnika  $\alpha$  modelu Cole-Cole zależy przede wszystkim od struktury cząsteczek dipolowych biorących udział w polaryzacji, co potwierdziły przeprowadzone badania i obliczenia,
- parametr  $\tau$  modelu Cole-Cole wraz ze wzrostem stopnia zawilgocenia badanych próbek znacznie maleje, niezależnie od temperatury pomiaru oraz stopnia degradacji termicznej próbki. Dzieje się tak, ponieważ rosnąca obecność wody w próbkach ze względu na swą wysoką polarność, dominuje w spektrum relaksacji cząsteczek dipolowych,
- zaobserwowano przesuwanie się maksimum charakterystyk w stronę czasów krótszych w miarę wzrostu stopnia zawilgocenia próbek, ponieważ rosnące zawilgocenie próbki powoduje skracanie się czasów relaksacji dipolowych.

Przeprowadzone badania i obliczenia eksperymentalne wykazały duży wpływ stopnia zawilgocenia na parametry próbek izolacji celulozowo-olejowej. Analizowany zakres zawilgocenia próbek izolacji celulozowo-olejowej odpowiada wartością spotykanym w pracujących jednostkach transformatorowych. W związku z tym otrzymane wyniki mogą być przydatne w diagnostyce transformatorów energetycznych.

Uzyskane wyniki oceny wpływu temperatury (rozdział 7) oraz zawilgocenia próbek wskazują, że prowadzone badania pozwolą określić także wpływ zesterzenia termicznego na parametry próbek izolacji celulozowo-olejowej.

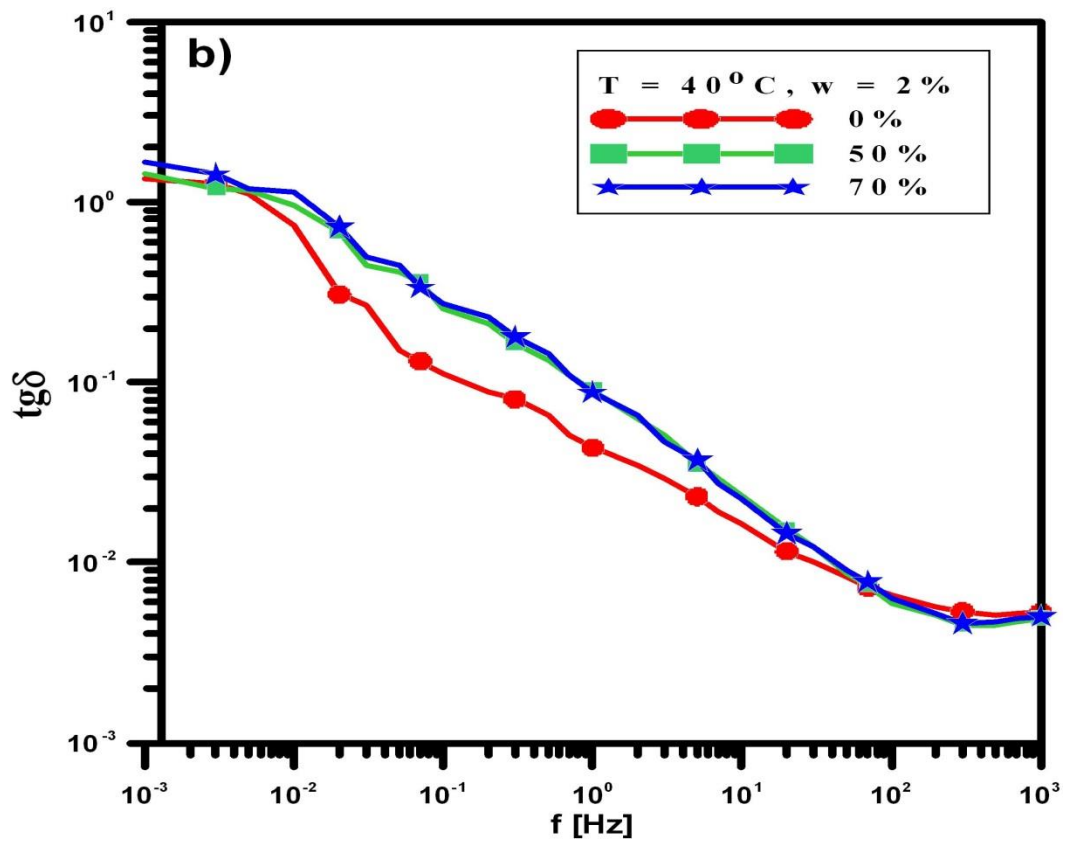
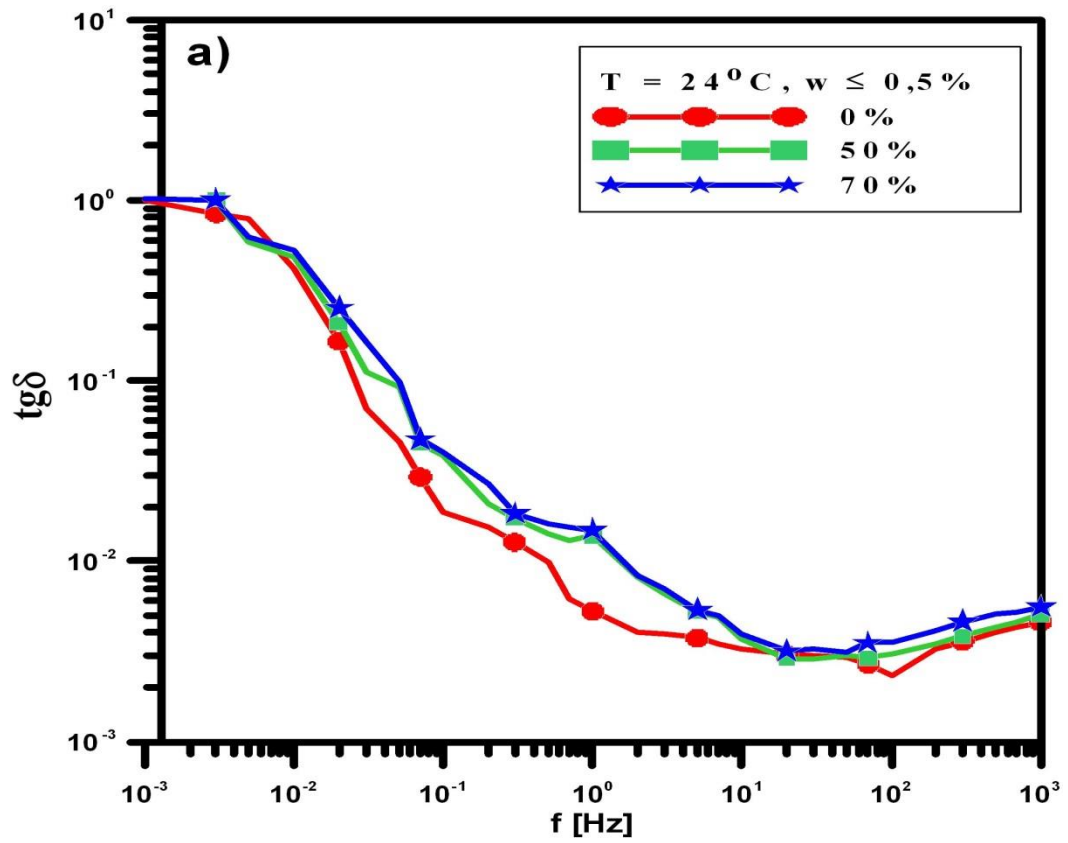
## **9. Analiza wpływu zesterzenia na parametry modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej**

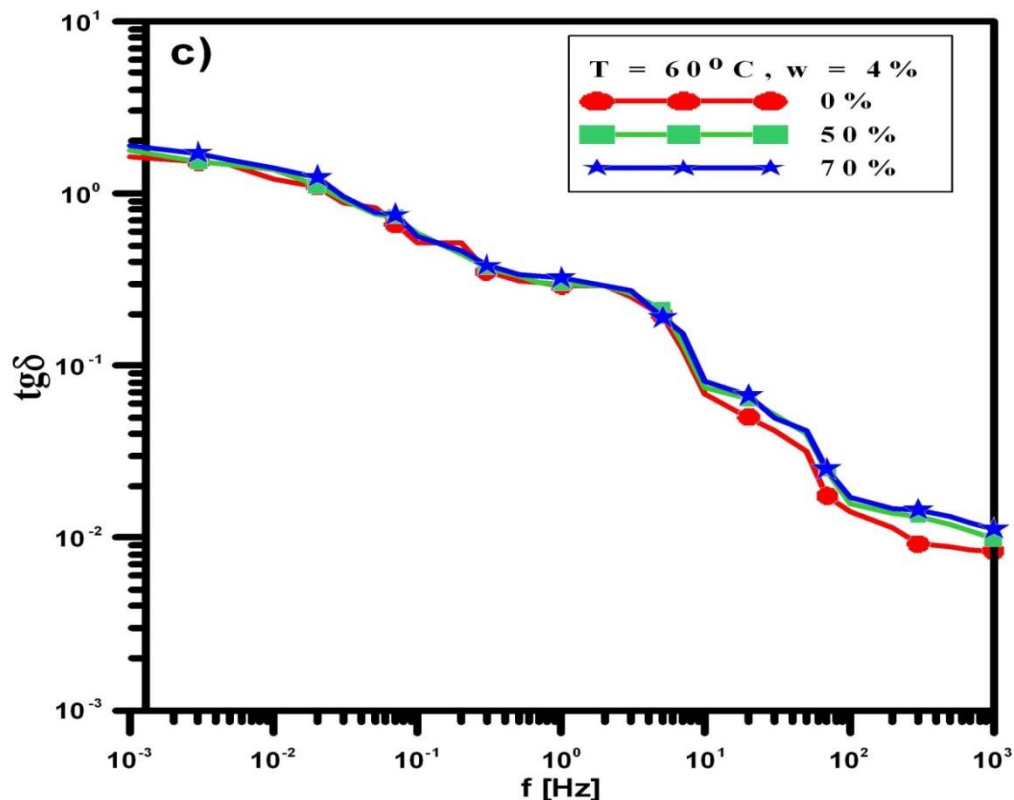
Analogicznie jak w rozdziale 7 oraz 8 niniejszej pracy postanowiono, że celem badań eksperymentalnych będzie określenie wpływu na parametry modelu Cole-Cole stopnia zesterzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej. Do powyższej analizy wykorzystano również pomiary wykonane metodą spektroskopii częstotliwościowej FDS. Otrzymane wyniki przeanalizowano pod kątem ich przydatności w przyszłej diagnostyce transformatorów energetycznych.

### **9.1 Charakterystyki dyspersyjne współczynnika stratności $\text{tg}\delta$ i pojemności C**

Wyznaczone charakterystyki dyspersyjne współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  i pojemności C uzyskano na podstawie eksperymentalnych badań laboratoryjnych metodą FDS. Sposób wykonywania pomiarów metodą FDS oraz laboratoryjny układ pomiarowy był analogiczny jak w poprzednich rozdziałach. Badane próbki oraz oznaczenie i sposób ich przygotowania przedstawiono w podrozdziale 6.2. W celu umożliwienia ujęcia stopnia zesterzenia celulozy w skali procentowej przyjęto w oparciu o dane literaturowe [62, 89] przyspieszone starzenie termiczne i oznaczono zgodnie z tabelą 6.4, typ 2 odpowiada 50% degradacji celulozy natomiast dla typu 3 stopień degradacji wynosił 70% wartości początkowej DP.

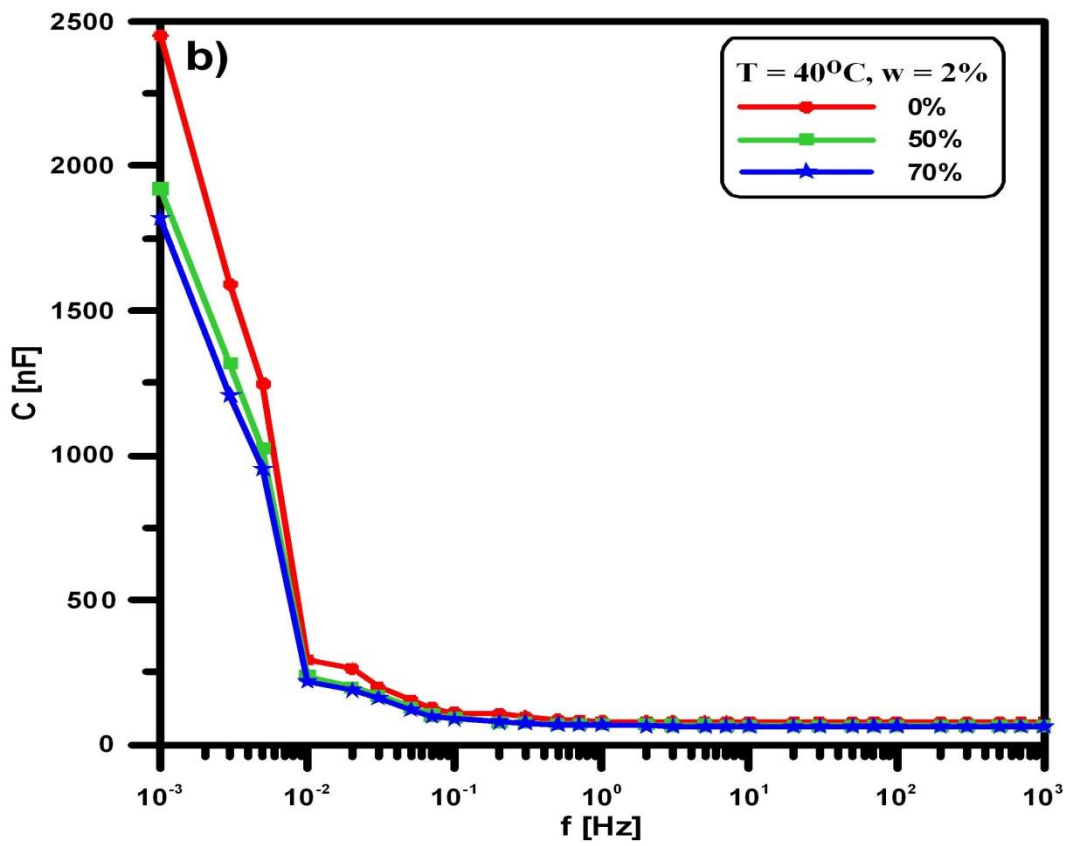
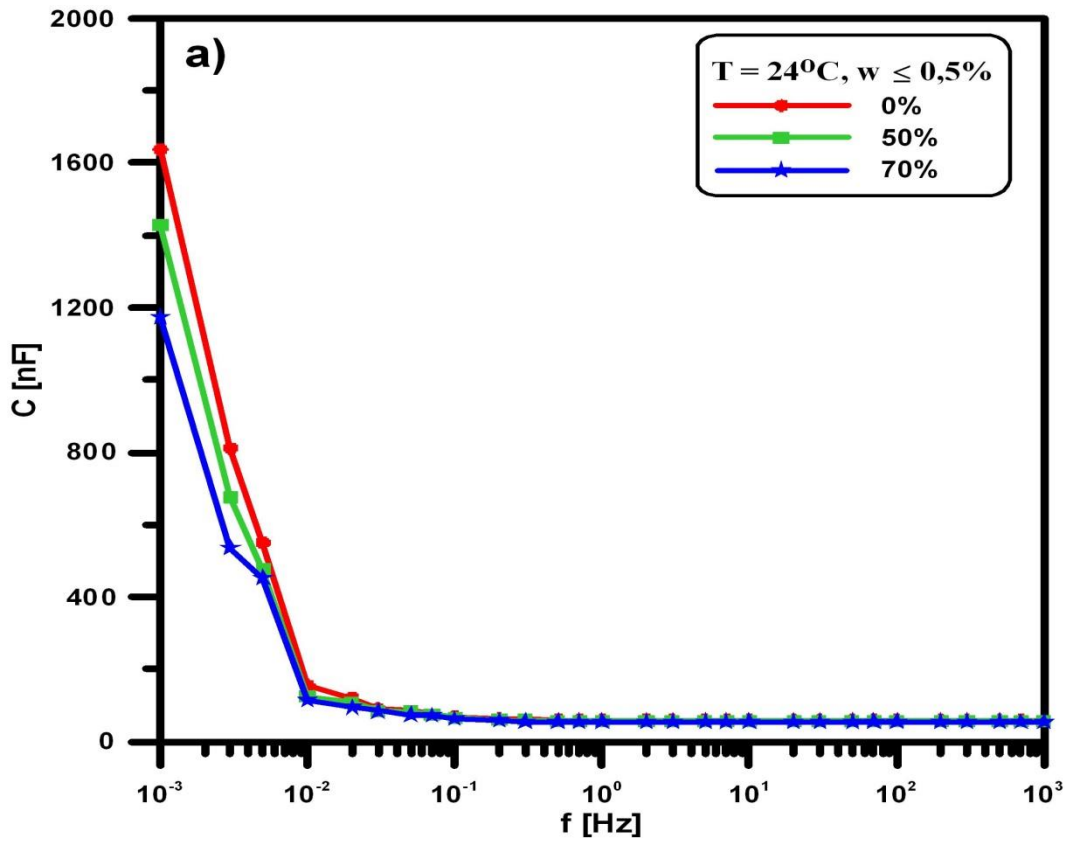
Na rysunku 9.1 przedstawiono przykładowe charakterystyki współczynnika stratności  $\text{tg}\delta(f)$ , natomiast na rysunku 9.2 przykładowe charakterystyki pojemności  $C(f)$ , dla próbek izolacji celulozowo-olejowej o różnym stopniu zawilgocenia i różnej temperaturze pomiaru. Na charakterystykach pokazano oddziaływanie wpływu stopnia zesterzenia izolacji, wykorzystując nową próbkę (niestarzoną), próbkę o utracie stopnia DP 50% oraz 70% wartości pierwotnej DP.

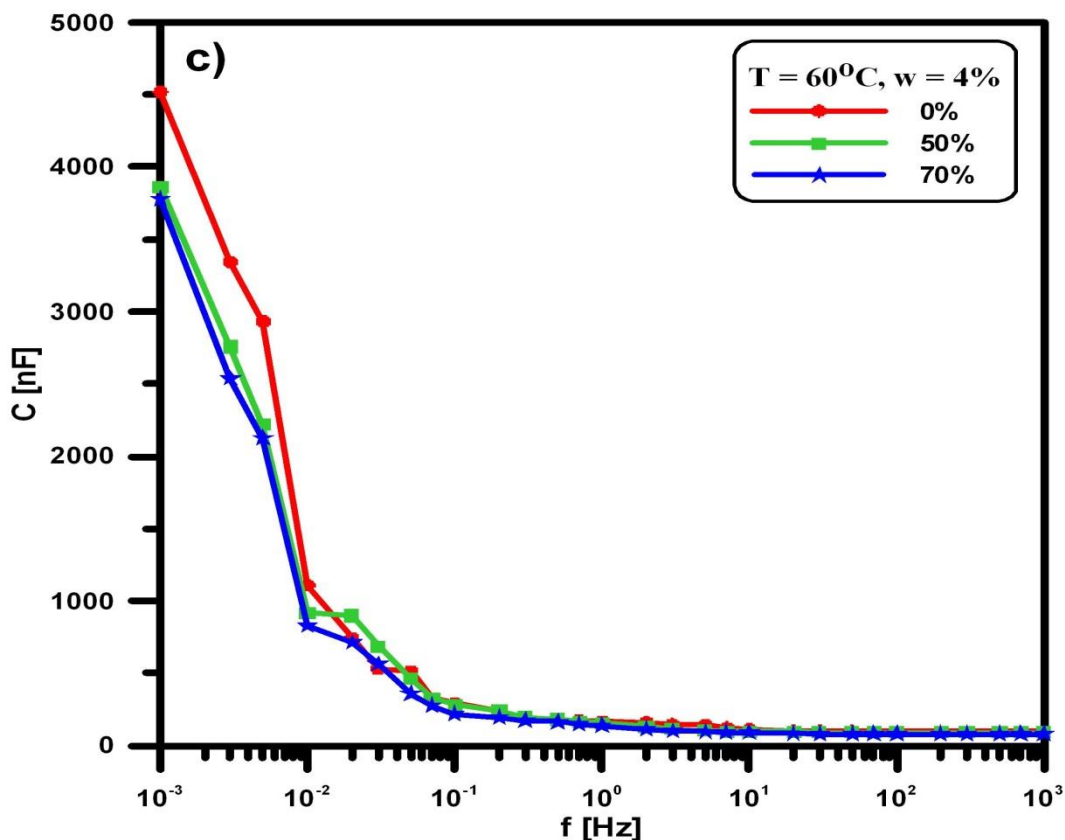




Rys. 9.1. Przykładowe charakterystyki współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  w funkcji zesterzenia,  
 a – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru  $24^\circ\text{C}$ ,  $w \leq 0,5\%$  ),  
 b – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru  $40^\circ\text{C}$ ,  $w = 2\%$  ),  
 c – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru  $60^\circ\text{C}$ ,  $w = 4\%$  ).

Przedstawione przykładowe charakterystyki dyspersyjne współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  w funkcji zesterzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej pokazują, że w miarę utraty stopnia DP w próbce, następuje wzrost wartości tego współczynnika. Obserwowane zmiany są jednak w ujęciu ilościowym o wiele mniejsze aniżeli analizowany w podrozdziale 8.1 wpływ stopnia zawilgocenia. Wniosek ten w pełni potwierdzają wyniki badań metodą FDS jakie publikowane są w literaturze przedmiotu, a które pochodzą z eksploatowanych jednostek transformatorowych [135]. Tym samym, prawidłowa ocena stopnia zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej, która opierałaby się jedynie na analizie charakterystyk dyspersyjnych  $\text{tg}\delta$  jest w praktyce niemożliwa. Zastosowanie elektrycznych schematów zastępczych układów izolacji transformatora, opartych o model Debye'a z wieloma mechanizmami relaksacji również przynosi niewielki skutek. W dalszej części rozdziału, przedstawiona zostanie natomiast możliwość wykorzystania do oceny stopnia zesterzenia parametru  $\alpha$  modelu Cole-Cole. Takie same wyniki uzyskano dla wszystkich pozostałych przebadanych próbek ujętych w tabeli 6.4. ze strony 51.





Rys. 9.2. Przykładowe charakterystyki pojemności C w funkcji zestarzenia,

- a – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 24°C, w ≤ 0,5% ),
- b – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 40°C, w = 2% ),
- c – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 60°C, w = 4% ).

Na podstawie zamieszczonych na rys. 9.2 przykładowych charakterystyk dyspersyjnych pojemności C próbek izolacji celulozowo-olejowej można ocenić wpływ degradacji termicznej izolacji. Zaobserwowano, że wzrost stopnia zestarzenia badanej próbki, a co za tym idzie spadek jej wartości DP powoduje spadek wartości pojemności C niezależnie od temperatury wykonywanego pomiaru oraz stopnia zawilgocenia próbki izolacji. Zauważono również, że przy częstotliwościach niższych tj.  $\leq$  ok.  $10^{-1}$  Hz pojemność nieznacznie zmniejsza swoją wartość. Ostatecznie stwierdzić można, że wzrost stopnia zestarzenia celulozy nieznacznie obniża wartość przenikalności elektrycznej izolacji celulozowo-olejowej. Jednakże, fakt ten jest obserwowany jedynie dla częstotliwości niskich (tj.  $\leq 10^{-1}$  Hz) oraz zmiana ta jest trudna w poprawnej weryfikacji w przypadku próbek o dużym stopniu zestarzenia (tj.  $\geq 50\%$ ). Takie same właściwości wykazują wszystkie pozostałe przebadane próbki (zgodnie z tabelą 6.4).

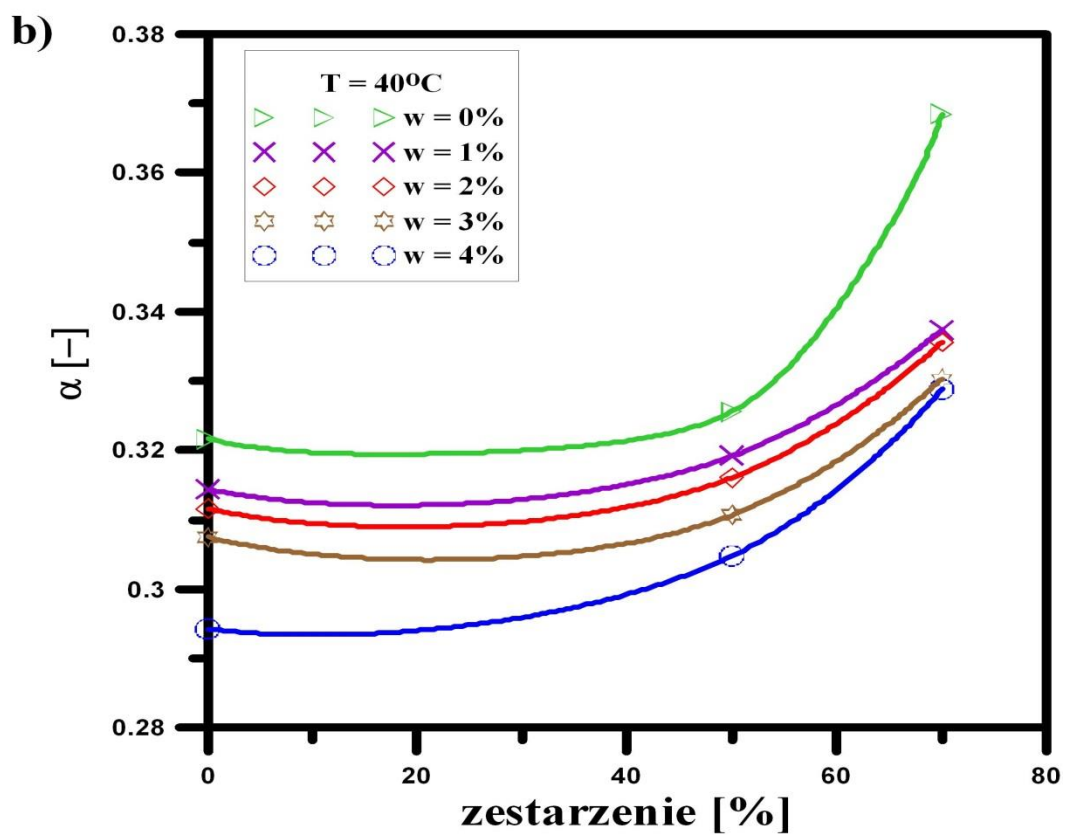
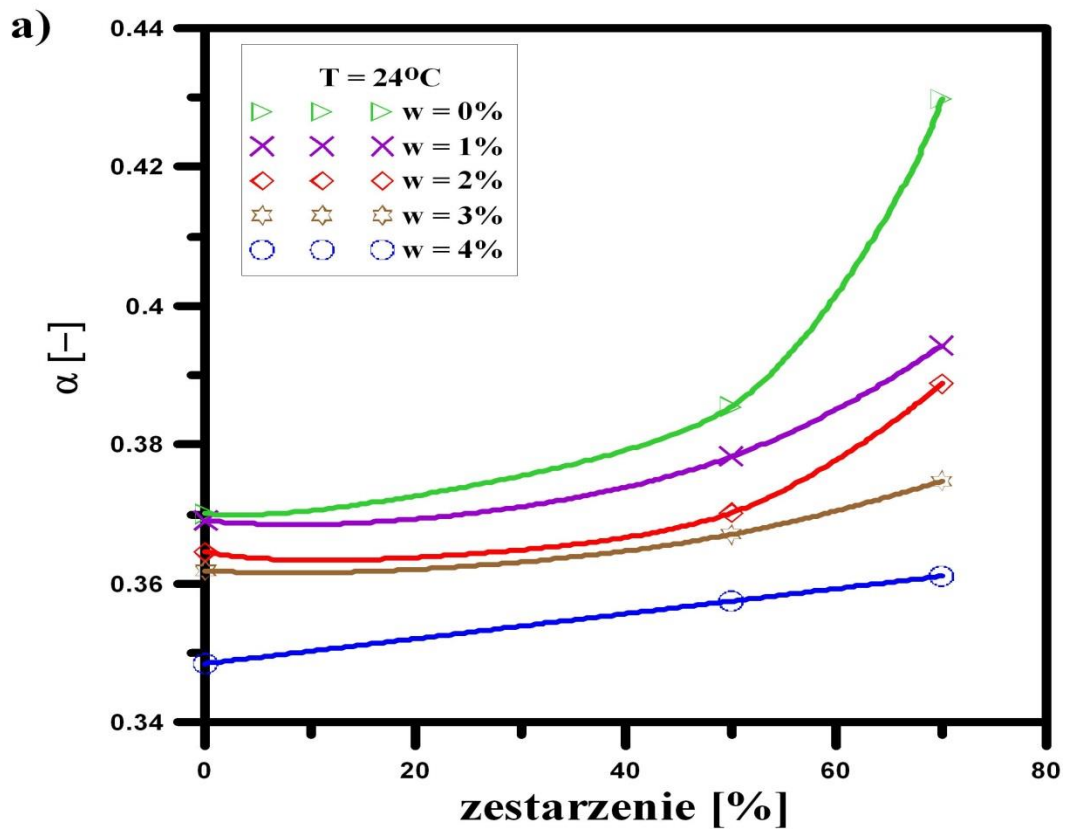
## 9.2 Charakterystyki parametrów $\alpha$ oraz $\tau$ modelu Cole-Cole

W celu wyznaczenia parametrów  $\alpha$  oraz  $\tau$  modelu Cole-Cole pod kątem oceny wpływu starzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej wykonano analogicznie jak w poprzednich rozdziałach niniejszej pracy, tj. 7.2 i 8.2 pomiary eksperymentalne metodą FDS. Metodologie wyznaczenia parametrów  $\alpha$  oraz  $\tau$  dokładnie opisano w podrozdziale 5.3. Wyznaczony w oparciu o dane eksperymentalne przykładowy wykres zespolonej przenikalności ( $\epsilon'$ ,  $\epsilon''$ ) modelu Cole-Cole, pokazano na rysunku 7.3. Sposób wyznaczenia parametrów  $\alpha$  oraz  $\tau$  modelu Cole-Cole przykładowej próbki zilustrowano na rysunku 7.4.

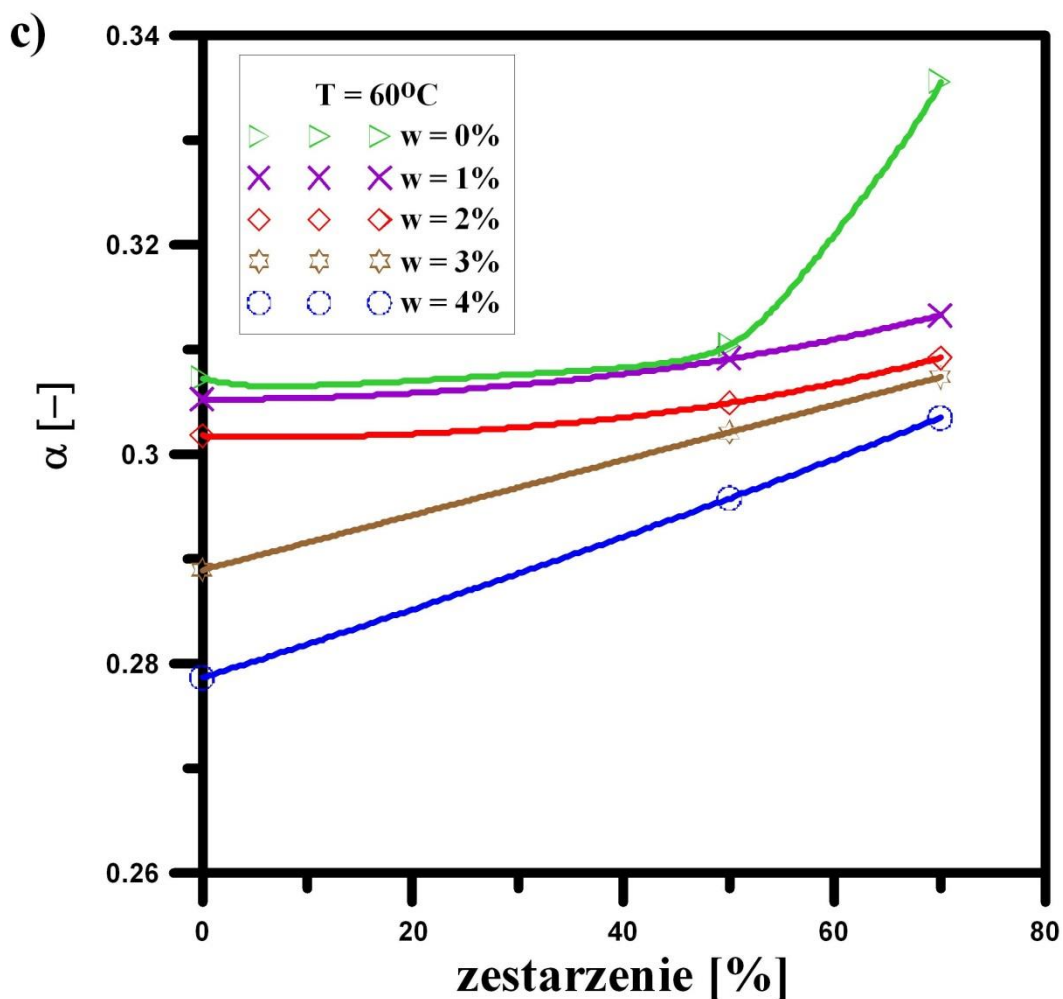
Rysunki 9.3 i 9.4 przedstawiają odpowiednio charakterystyki współczynnika  $\alpha$  oraz stałej czasowej  $\tau$  modelu Cole-Cole dla przykładowych próbek izolacji celulozowo-olejowej w funkcji zestarzenia. W tabeli 9.1 zamieszczono wyniki obliczeń przykładowych wartości parametrów  $\alpha$  oraz stałej czasowej  $\tau$ .

Tabela 9.1. Przykładowe wartości parametrów  $\alpha$  oraz stałej czasowej  $\tau$  modelu Cole-Cole

Próbka nowa (temperatura pomiaru 24°C)					
w [%]	≤ 0,5%	1%	2%	3%	4%
$\alpha$ [-]	0,370	0,369	0,364	0,361	0,348
$\tau$ [s]	5028,81	2704,94	1982,40	1028,54	586,52
Próbka 2 – utrata 50% DP (temperatura pomiaru 40°C)					
$\alpha$ [-]	0,325	0,319	0,316	0,310	0,304
$\tau$ [s]	2132,46	908,54	597,32	319,71	153,98
Próbka 3 – utrata 70% DP (temperatura pomiaru 60°C)					
$\alpha$ [-]	0,335	0,313	0,309	0,307	0,303
$\tau$ [s]	1557,04	547,42	356,25	234,25	146,10





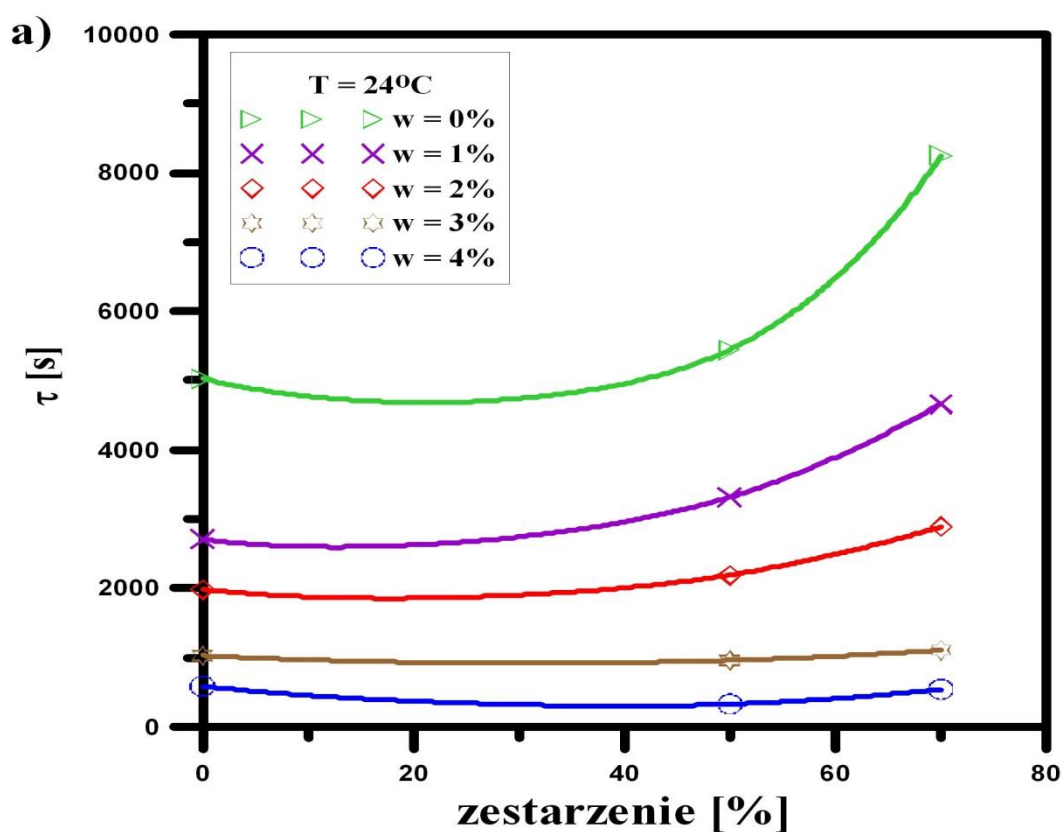


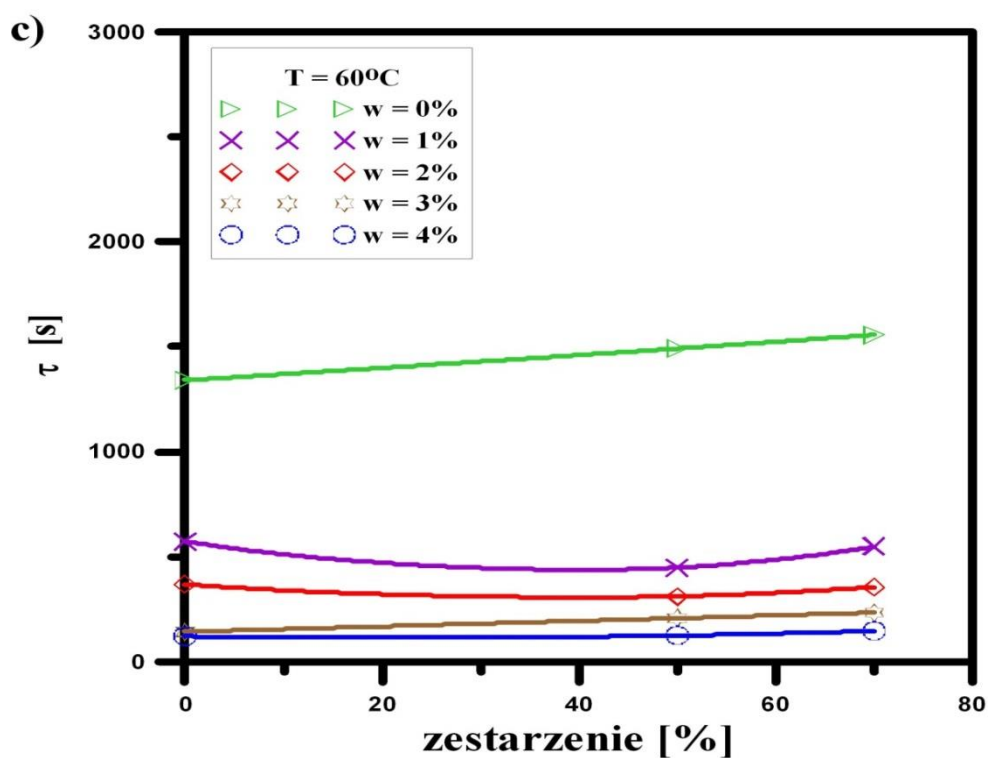
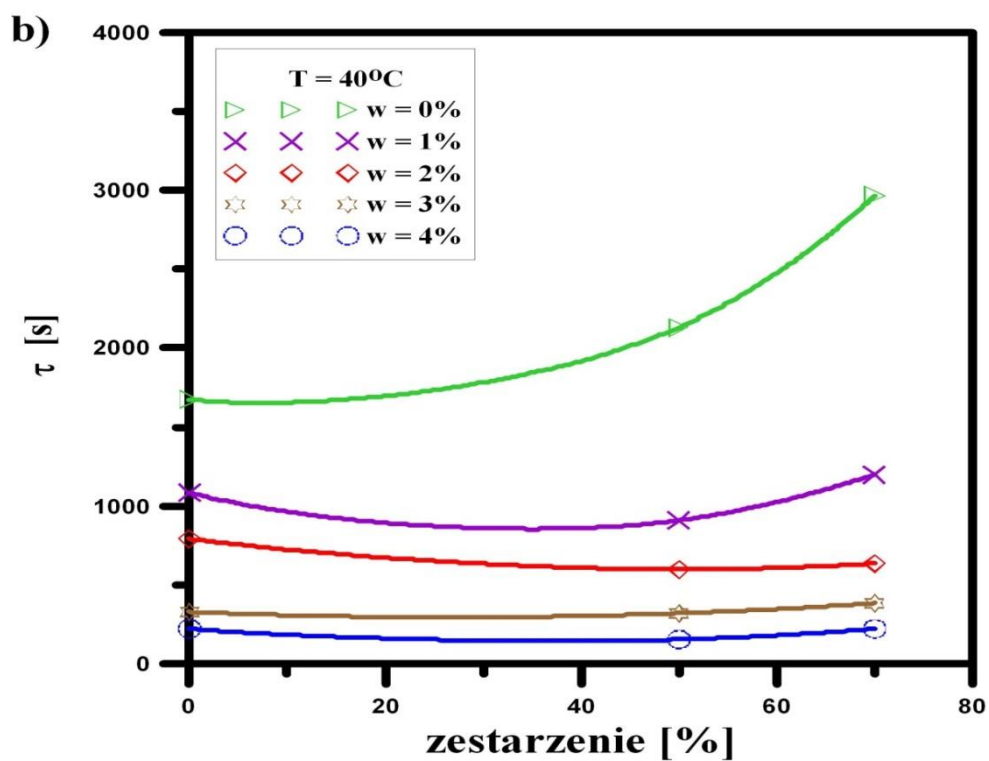
Rys. 9.3. Przykładowe charakterystyki parametru  $\alpha$  w funkcji zesterzenia próbek izolacji,  
 a – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 24°C),  
 b – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 40°C),  
 c – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 60°C).

Analizując wpływ zesterzenia na parametr  $\alpha$  modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej (rys. 9.3) zaobserwowano, że wskutek zwiększającego się zesterzenia wartość parametru  $\alpha$  istotnie rośnie niezależnie od stopnia zawilgocenia próbki oraz temperatury pomiaru. Przyczyną tego, jest wzrost zesterzenia próbki izolacji powodując skracanie długości makrocząsteczek celulozy, tzn. zmiana struktury dielektryka.

Dokonana obserwacja ma niezwykle istotne, praktyczne znaczenie. Pozwala ona mianowicie sformułować wniosek, że parametr  $\alpha$  modelu Cole-Cole można wykorzystać w metodzie FDS do szacowania stopnia zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej. Przedstawione na rysunku 9.3 charakterystyki w żadnym punkcie nie przecinają się ze sobą,

niezależnie od stopnia zawilgocenia próbki oraz temperatury eksperymentu. Ponadto, obserwowany wzrost wartości parametru  $\alpha$  wraz ze stopniem zasterzenia jest zdecydowanie silniejszy w wyższych temperaturach. Przyczyną może być migrująca z celulozy do oleju woda, która zmniejsza swój „maskujący” zmiany starzeniowe efekt. W tym miejscu stwierdzić należy, że główna teza pracy, cyt.: „Wykorzystując metody FDS (Frequency Dielectric Spectroscopy) oraz odpowiedzi dielektrycznej Cole-Cole, możliwe jest szacowanie degradacji termicznej próbki izolacji celulozowo-olejowej niezależnie od stopnia jej zawilgocenia oraz temperatury” znalazła swoje eksperymentalne udowodnienie. W przypadku pozostałych przygotowanych próbek, (zgodnie z tabelą 6.4) otrzymane wyniki oraz wnioski są identyczne.





Rys. 9.4. Przykładowe charakterystyki parametru  $\tau$  w funkcji zesterzenia próbek izolacji,  
 a – próbki o wskaźniku DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 24°C),  
 b – próbki o wskaźniku DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 40°C),  
 c – próbki o wskaźniku DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru 60°C).

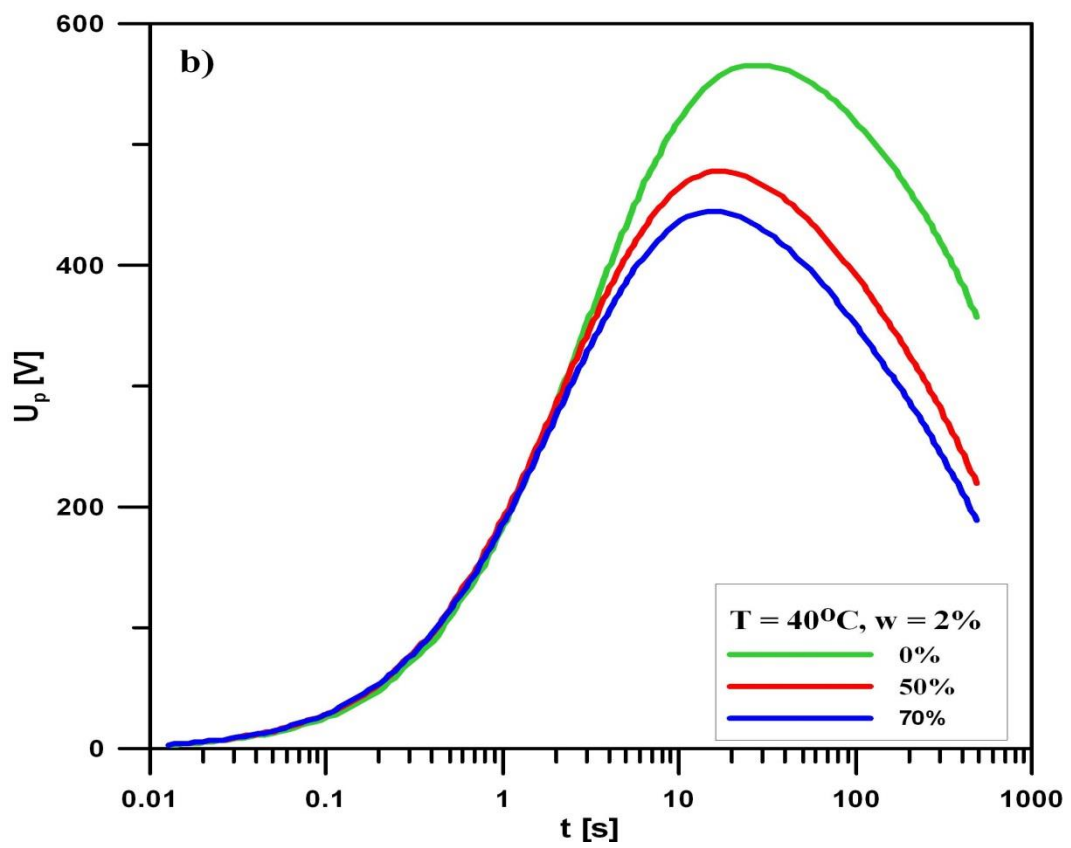
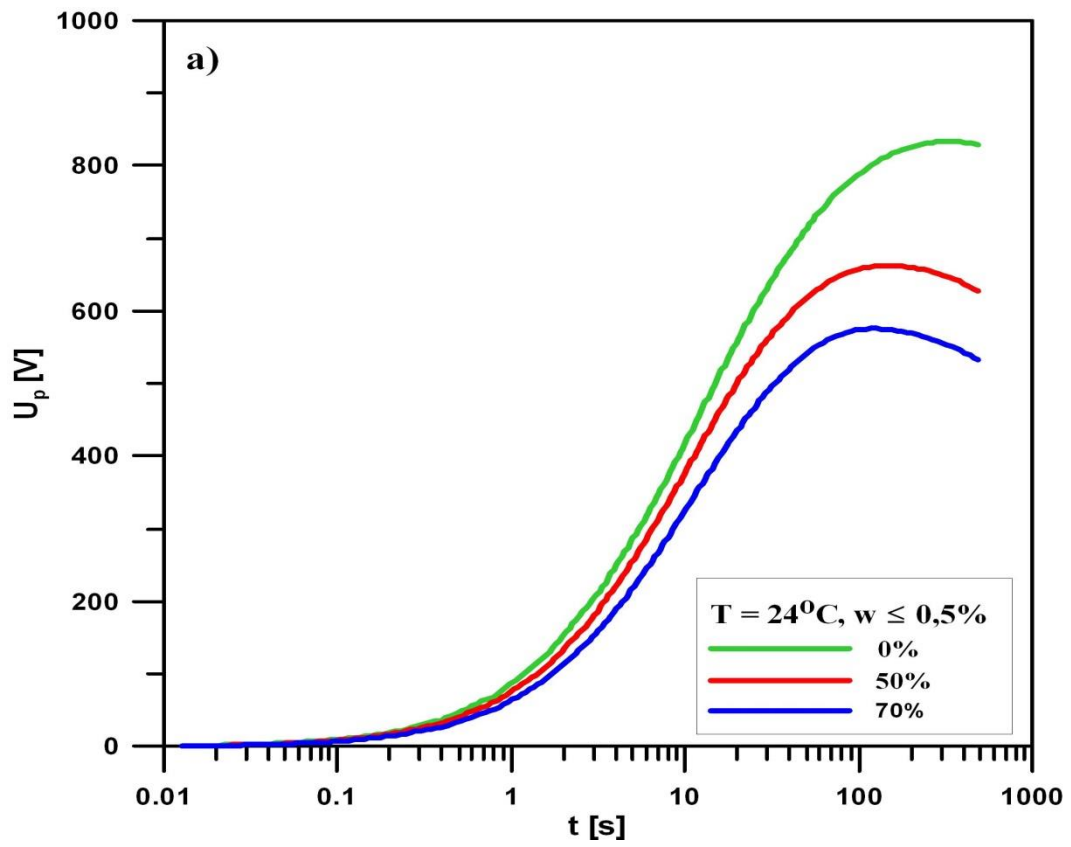
Parametr  $\tau$  modelu Cole-Cole wraz ze wzrostem zesterzenia (spadek wartości stopnia DP celulozy) zwiększa swoją wartość jedynie dla próbek o niewielkim stopniu zawilgocenia ( $t_j \leq 1\%$ ) oraz szczególnie w zakresie niższych temperatur ( $t_j \leq 40^\circ\text{C}$ ). Stwierdzono, że wzrost zawilgocenia próbek powyżej 1% wywołuje trudne w interpretacji zmiany stałej czasowej  $\tau$  modelu Cole-Cole skutkiem analizowanego wpływu stopnia zesterzenia celulozy. Tym samym, parametr  $\tau$  nie nadaje się do oceny stopnia zesterzenia badanej izolacji szczególnie, że w praktyce izolacja długo eksploatowanych transformatorów energetycznych jest również silnie zawilgocona. Dzieje się tak dlatego, ponieważ woda jest jednym z produktów starzenia celulozy. Przytoczone wnioski wyciągnięto również w przypadku pozostałych przebadanych próbek (tabela 6.4 na stronie 51).

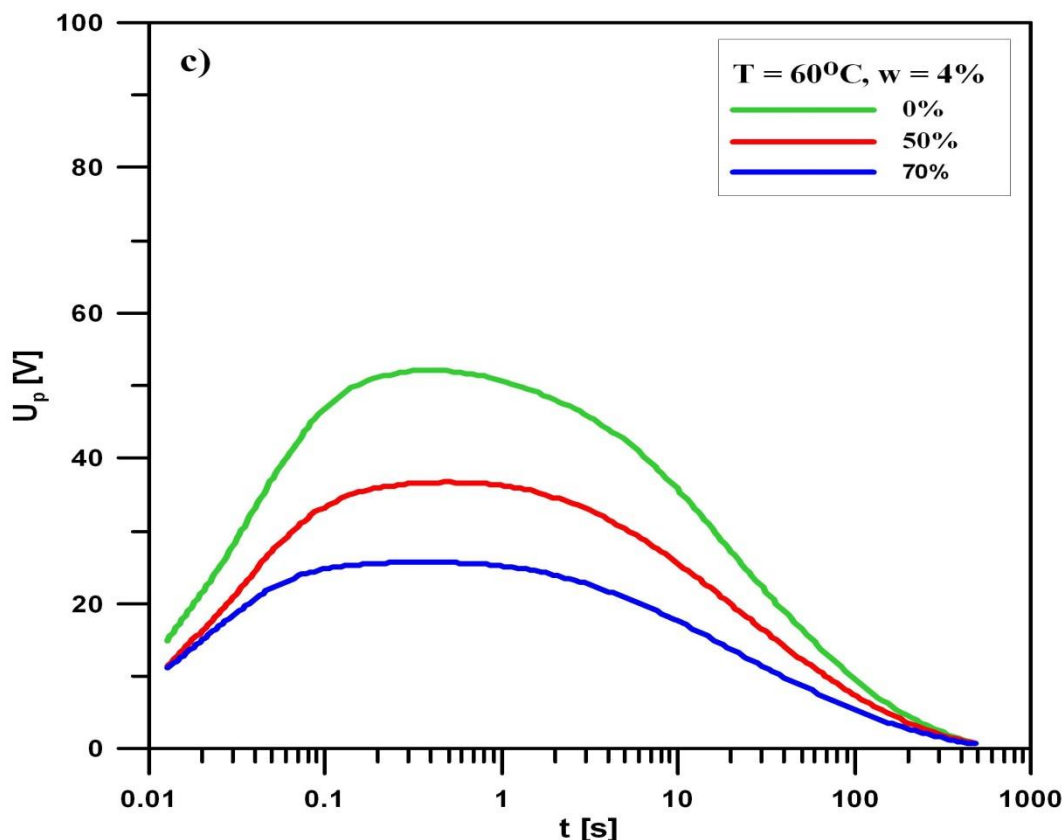
### **9.3 Analiza symulacyjna charakterystyki napięcia powrotnego z wykorzystaniem schematu szeregowo-równoległego Cole-Cole**

Szeregowo-równoległy schemat zastępczy izolacji celulozowo-olejowej oparty na modelu Cole-Cole oraz sposób wyznaczenia parametrów tego schematu został szczegółowo opisany w rozdziale 5 niniejszej pracy. Wynik zastosowania metody aproksymacji ziarnistej impedancji charakterystycznej  $Z_a$  dla przykładowej próbki pokazano na rysunku 7.7 natomiast na rysunku 7.8 pokazano przykładowy zaprojektowany w programie PSpices Schematics szeregowo-równoległy schemat zastępczy próbki izolacji celulozowo-olejowej [73, 96, 154].

Celem badań była analiza oddziaływania stopnia zesterzenia izolacji na parametry schematu zastępczego izolacji celulozowo-olejowej wyznaczonego w oparciu o model Cole-Cole. W tym celu wykonano symulację komputerową napięcia powrotnego metodą RVM dla przykładowo dobranego czasu ładowania 10 s oraz czasu zwarcia 5 s.

Rysunek 9.5 przedstawia przykładowe charakterystyki napięcia powrotnego, otrzymane na drodze symulacji komputerowej przy wykorzystaniu schematów zastępczych.





Rys. 9.5. Przykładowe charakterystyki napięcia powrotnego  $U_p$  w funkcji zesterzenia próbek izolacji,  
 a – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru  $24^{\circ}\text{C}$ ,  $w \leq 0,5\%$  ),  
 b – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru  $40^{\circ}\text{C}$ ,  $w = 2\%$  ),  
 c – próbki o wskaźniku utraty DP 0%, 50%, 70% ( temperatura pomiaru  $60^{\circ}\text{C}$ ,  $w = 4\%$  ).

Analizując przykładowe charakterystyki napięcia powrotnego w funkcji zesterzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej (rys. 9.5) zaobserwowano, że proces narastania napięcia powrotnego nieznacznie przesunę się w stronę czasów krótszych i powoduje obniżanie się maksimum charakterystyk w miarę wzrostu stopnia zesterzenia. Powtarzalność tego procesu zachodzi niezależnie od temperatury pomiaru i stopnia zawilgocenia próbki. Dzieje się tak między innymi dlatego, że wzrost zesterzenia próbki jest raczej słabo powiązany z dominującą stałą czasową relaksacji, która odpowiada czasowi przy którym charakterystyka osiąga swe maksimum. Obniżanie się maksimum charakterystyk skutkiem wzrostu zesterzenia izolacji wywołane jest najprawdopodobniej powiększającym się rozkładem stałych czasowych mechanizmów relaksacji makrocząsteczek celulozy. W miarę zwiększającego się stopnia zesterzenia makrocząsteczki celulozy rozpadają się na mniejsze, dając tym samym słabszą polaryzację w ujęciu ilościowym. W przypadku pozostałych przebadanych próbek (tabela 6.4) wyciągnięto takie same wnioski.

Wykonana analiza, pod kątem zestarzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej dowodzi poprawności odpowiedzi napięciowej badanych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej.

Przeprowadzone badanie eksperymentalne oraz obliczenia potwierdziły sensowność wykorzystania zastępczego schematu szeregowo-równoległy wyznaczonego z modelu Cole-Cole izolacji celulozowo-olejowej do oceny wpływu stopnia jej zestarzenia.

#### **9.4 Podsumowanie wyników eksperymentalnych i symulacyjnych**

Wykonane pomiary eksperymentalne metodą spektroskopii częstotliwościowej FDS oraz obliczenia pozwoliły na wykonanie oceny wpływu zestarzenia na parametry modelu Cole-Cole izolacji celulozowo-olejowej. Przeprowadzono także analizę oddziaływania tego procesu na parametry schematu zastępczego szeregowo-równoległego izolacji celulozowo-olejowej wyznaczonego w oparciu o model Cole-Cole.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono:

- wzrost stopnia zestarzenia (tzn. spadek wartości stopnia polimeryzacji DP celulozy) wpływa nieznacznie na zwiększenie wartości współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$ ,
- wzrost stopnia zestarzenia powoduje nieznaczny spadek wartości pojemności  $C$  niezależnie od temperatury wykonywanego pomiaru oraz stopnia zawilgocenia próbki izolacji,
- zaobserwowano, że wskutek zwiększającego się zestarzenia wartość parametru  $\alpha$  istotnie rośnie, ponieważ wzrost zestarzenia próbki izolacji celulozowo-olejowej powoduje skracanie długości makrocząsteczek celulozy, tzn. zmiana struktury dielektryka,
- parametr  $\tau$  modelu Cole-Cole wraz ze wzrostem zestarzenia nieznacznie zwiększa swoją wartość dla próbek o niewielkim stopniu zawilgocenia ( $\leq 1\%$ ) oraz w niższych temperaturach ( $\leq 40^\circ\text{C}$ ). W pozostałych przypadkach jego zmiany są niejednoznaczne oraz trudne w interpretacji,
- zaobserwowano, że proces narastania napięcia powrotnego nieznacznie przesuwa się w stronę czasów krótszych oraz obniżają się maksima charakterystyk w miarę wzrostu stopnia zestarzenia. Powtarzalność tego procesu zachodzi niezależnie od temperatury pomiaru i stopnia zawilgocenia próbki.

Wykonane pod kątem oceny stopnia zesterzenia celulozy badania i obliczenia eksperymentalne potwierdziły wpływ procesów starzeniowych na parametry próbek izolacji celulozowo-olejowej. Rozpatrywano zakres zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej tzn. 50% oraz 70% utraty początkowej wartości stopnia polimeryzacji DP celulozy. Zakresy te odpowiadają wartością po przekroczeniu których, należy rozważyć ewentualny remont jednostki transformatorowej w niedługim czasie (50%), znaczne obniżenie mocy maksymalnej jednostki bądź zastanowić się nad bliskim jej odstawieniem z dalszej eksploatacji w systemie z uwagi na istotnie rosnące prawdopodobieństwo wystąpienia poważnej awarii (70%). W związku z powyższym otrzymane wyniki mogą być przydatne w diagnostyce transformatorów energetycznych.



## 10. Badania powtarzalności i odtwarzalności wyników pomiarowych

Na podstawie rezultatów badań laboratoryjnych metodą spektroskopii częstotliwościowej (FDS) próbek izolacji celulozowo-olejowej dokonano oceny powtarzalności i odtwarzalności wyników pomiarowych. Opisano, także metodę przeprowadzenia niezbędnych pomiarów dla zastosowanych analiz statystycznych, a także samą metodologię badań.

### 10.1 Parametryczne i nieparametryczne testy istotności

W celu przeprowadzenia testów powtarzalności i odtwarzalności laboratoryjnych wyników pomiarowych w sposób losowy wybrano próbkę spośród wszystkich wcześniej badanych (tabela 6.4, str. 51), określono dla niej częstotliwość oraz temperaturę. Zestawienie wylosowanych parametrów przedstawia tabela 10.1.

Tabela 10.1. Wylosowana próbka i parametry pomiaru

Wylosowana próbka	f [Hz]	T [°C]	w [%]
Próbka nowa, suszenie w 120°C pod próżnią	10	40	1

Powtarzalność otrzymanych wyników badań laboratoryjnych próbek izolacji celulozowo-olejowej metodą spektroskopii częstotliwościowej została przeprowadzona na podstawie parametrycznego testu istotności. Bazuje on na analizie wariancji dla wielu średnich klasyfikacji pojedynczej [3, 50]. Podstawą testu jest rozkład F Snedecora oraz założenie, że danych jest k populacji o rozkładzie normalnym  $N(m_i, \sigma_i)$ , gdzie  $i=1,2,\dots,k$  lub zbliżonym do normalnego, przy czym wariancje wszystkich k populacji są równe, tzn.  $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2 = \sigma^2$  (lecz nie muszą być znane). Na podstawie tego twierdzenia przed przeprowadzeniem testu należało sprawdzić czy otrzymane wyniki z badań laboratoryjnych mieszczą się w ramach rozkładu normalnego oraz czy ich wariancje są sobie równe. Typ rozkładu został określony na podstawie nieparametrycznego testu istotności, zwanym testem zgodności  $\chi^2$  [3, 50]. Rozkład  $\chi^2$  opisuje równanie:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i} \quad (10.1)$$

gdzie:  $r$  – liczba rozłącznych klas wyników,  
 $n_i$  – liczebność  $i$ -tej klasy,  
 $p_i$  – prawdopodobieństwo wystąpienia badanej cechy w  $i$ -tej klasie,  
 $n$  – ogólna liczba wyników.

W celu przeprowadzenia testu zgodności  $\chi^2$  wylosowanej próbki wykonano 50 pomiarów współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  izolacji celulozowo-olejowej przy stałych wcześniej wylosowanych warunkach. Obliczenia rozkładu dla tych warunków przedstawia tabela 10.2.

Tabela 10.2. Rozkład  $\chi^2$  wyznaczony z wyników pomiarów eksperymentalnych

Klasa ( r )	$\text{tg}\delta$ [-]	Liczba obserwacji ( $n_i$ )	Liczba oczekiwana	$\chi^2$
1	Poniżej 0,01237	1	0,9	0,0001
2	0,01237– 0,01245	2	2,6	0,020
3	0,01245– 0,01252	5	6,3	0,083
4	0,01252– 0,0126	10	10,6	0,001
5	0,0126– 0,01268	18	12,4	7,707
6	0,01268– 0,01276	11	9,7	0,041
7	0,01276– 0,01283	2	5,2	3,878
8	Powyżej 0,01291	1	2,5	0,847
		50		12,579

Hipotezy testu zakładają odpowiednio:

$H_0: F(x) \in \Omega$ ; gdzie  $\Omega$  jest klasą wszystkich dystrybuant normalnych,

$H_1: F(x) \notin \Omega$

Wartość odczytaną z tabeli rozkładu  $\chi^2$  dla przyjętego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$  przedstawia tabela 10.3.

Tabela 10.3. Obliczona i odczytana z tabeli wartość  $\chi^2$  dla testu jednorodności wariancji

$\alpha$	Stopnie swobody (r-1)	$\chi_{\alpha^2}$	$\chi^2$
0,05	7	14,067140	12,579946

Na podstawie przeprowadzonego testu zgodności  $\chi^2$ , nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$  ponieważ  $\chi^2 = 12,579946 < 14,067140 = \chi_{\alpha^2}$ . Oznacza to, że rozkład wyników współczynnika stratności  $tg\delta$  jest zgodny z typem normalnym. Wyniki testu zgodności przedstawione są na rysunku 10.1.

Równość wariancji danych dla analizy powtarzalności wyników współczynnika stratności  $tg\delta$  została zbadana w oparciu o test jednorodności wielu wariancji [3]. Test ten oparty jest, także na rozkładzie  $\chi^2$  oraz założeniu, że jest danych  $k$  populacji normalnych  $N(m_i, \sigma_i)$ , gdzie  $i = 1, 2, \dots, k$ , o liczebnościach  $n_i$ . Rozkład  $\chi^2$  opisują następujące równania:

$$\chi^2 = \frac{2,303}{c} [(n - k) \log \tilde{s}^2 - \sum_{i=1}^k \log \hat{s}_i^2] \quad (10.2)$$

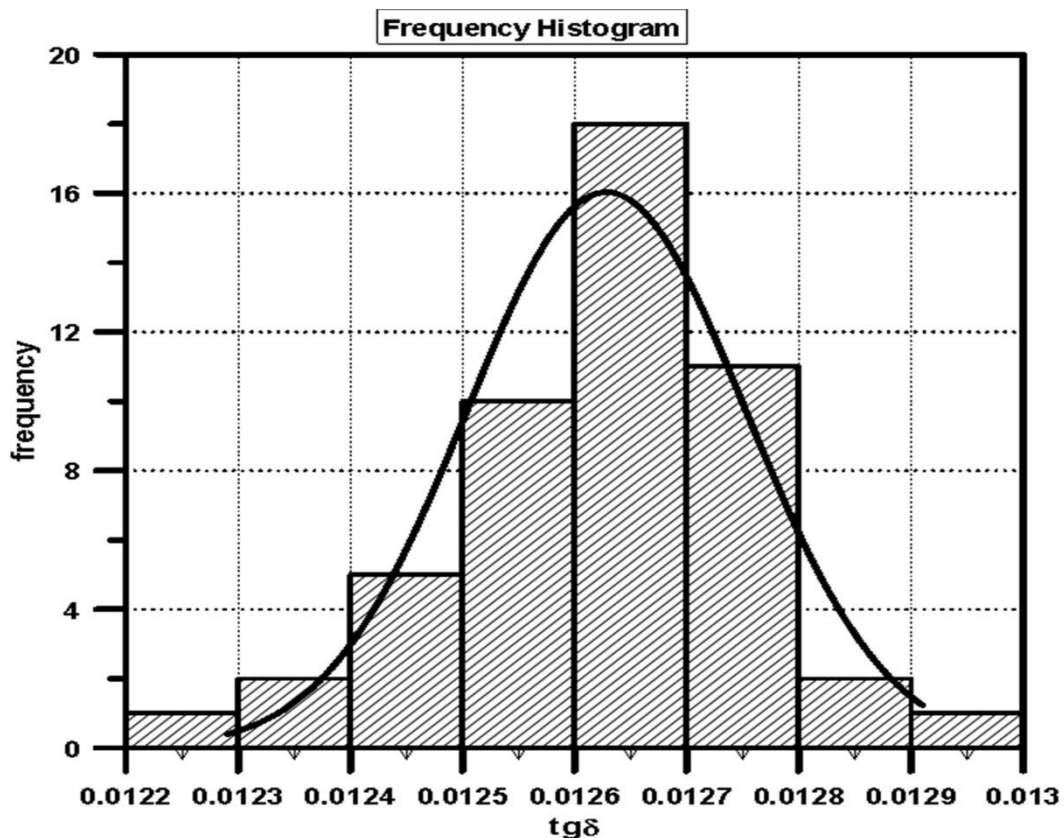
$$c = 1 + \frac{1}{3(k - 1)} \left( \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i - k} - \frac{1}{n - k} \right) \quad (10.3)$$

$$\tilde{s}^2 = \frac{1}{n - k} \sum_{i=1}^k (n_i - 1) \hat{s}_i^2 \quad (10.4)$$

$$\hat{s}_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \quad (10.5)$$

gdzie:  $x_{ij}$  – wynik kolejnej próby,

$\bar{x}_i$  – średnia arytmetyczna  $i$ -tej populacji.



Rys. 10.1. Rozkład wyników współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$

Aby przeprowadzić test powtarzalności wyników wykonywano przez 5 dni po 10 pomiarów współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  próbki izolacji celulozowo-olejowej zgodnie z wylosowanymi założeniami (tab. 10.1). Dane pomiarowe, na których zostały przeprowadzone obliczenia przedstawiono w tabeli 10.4.

Tabela 10.4. Wyniki pomiarów współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  próbek izolacji celulozowo-olejowej celem przeprowadzenia testu powtarzalności pomiarów

Próbka nowa , suszenie w 120°C pod próżnią, $f = 10 \text{ Hz}$ , $T = 40^\circ\text{C}$ , $w = 1\%$					
Pomiar ( k )	Dzień 1	Dzień 2	Dzień 3	Dzień 4	Dzień 5
1	0,01275	0,01269	0,01276	0,01251	0,01266
2	0,01271	0,01267	0,01271	0,01259	0,01275
3	0,01269	0,01271	0,01279	0,01269	0,01272
4	0,01263	0,01273	0,01258	0,01264	0,01287
5	0,01274	0,01277	0,01273	0,01275	0,01282

6	0,01279	0,01274	0,0128	0,01286	0,01288
7	0,01281	0,01278	0,01277	0,01277	0,01279
8	0,01276	0,01266	0,01261	0,01274	0,01264
9	0,01268	0,01275	0,01275	0,01288	0,0127
10	0,0127	0,01273	0,01281	0,01267	0,01285

Hipotezy testu zakładają odpowiednio:

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2$  ; gdzie  $\sigma$  jest wariancją danej populacji,

$H_1$ : nie wszystkie wariancje wyników są sobie równe.

Obliczoną wartość rozkładu  $\chi^2$  oraz odczytaną z tabeli dla poziomu istotności  $\alpha = 0,01$  przedstawia tabela 10.5.

Tabela 10.5. Obliczona o odczytana z tabeli rozkładu wartość  $\chi^2$  dla testu jednorodności wielu wariancji

$\alpha$	Stopnie swobody (k-1)	$\chi_{\alpha}^2$	$\chi^2$
0,01	4	13,276704	10,453941

Ponieważ zachodzi nierówność  $\chi^2 = 10,453941 < 13,276704 = \chi_{\alpha}^2$ , to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$  twierdzącej, że wszystkie wariancje wyników współczynnika stratności  $tg\delta$  są sobie równe. Dane przedstawione w tabeli 10.4 można więc opisać rozkładem normalnym a ich wariancje są sobie równe. Na tej podstawie można przeprowadzić test analizy wariancji dla wielu średnich w celu określenia powtarzalności wyników eksperymentu. Wartość rozkładu F Snedecora opisują równania:

$$F = \frac{\hat{s}_1^2}{\hat{s}_2^2} \quad (10.6)$$

$$\hat{s}_1^2 = \frac{\sum_{i=1}^k (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2 n_i}{k - 1} \quad (10.7)$$

$$\hat{s}_2^2 = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n - k} \quad (10.8)$$

gdzie:  $\bar{x}$  – średnia arytmetyczna ogólna.

Hipotezy testu zakładają odpowiednio [50]:

$H_0$ :  $m_1=m_2=m_3=m_4=m_5$  ; gdzie  $m$  jest średnią z populacji,

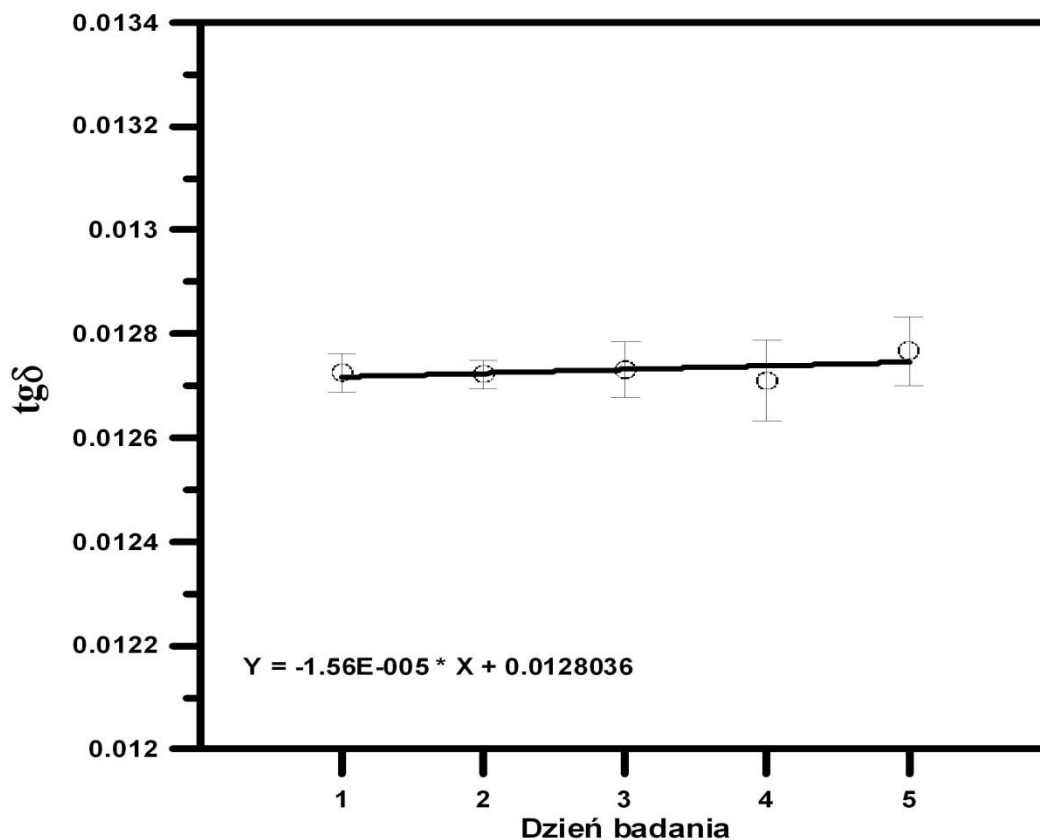
$H_1$ : nie wszystkie średnie są sobie równe.

Obliczoną wartość rozkładu F oraz odczytaną z tabeli wartość F dla poziomu istotności  $\alpha=0,05$  przedstawia tabela 10.6.

Tabela 10.6. Obliczona i odczytana z tabeli rozkładu wartość F dla testu analizy wariancji dla wielu średnich

$\alpha$	1 stopień swobody (k-1)	2 stopień swobody (n-k)	$F_\alpha$	F
0,05	4	45	2,578739	0,753388

Ponieważ zachodzi nierówność  $F = 0,753388 < 2,578739 = F_\alpha$  to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$  twierdzącej, że wszystkie średnie wyników współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  są sobie równe. Dowodzi to jednocześnie, że w wybranym parametrze pomiarowym zachodzi powtarzalność wyników eksperymentalnych z 5%-tą tolerancją błędów. Na rysunku 10.2 został przedstawiony w sposób graficzny wynik testu.



Rys. 10.2. Powtarzalność wyników współczynnika stratności tgδ

W celu sprawdzenia odtwarzalności wyników wykonywano 5 identycznych próbek izolacji celulozowo-olejowej zgodnie z wylosowanymi założeniami (tab. 10.1), następnie przeprowadzono 10 pomiarów współczynnika stratności tgδ każdej z próbek. Dane pomiarowe, na których zostały przeprowadzone obliczenia przedstawiono w tabeli 10.7.

Tabela 10.7. Wyniki pomiarów współczynnika stratności tgδ próbek izolacji celulozowo-olejowej celem przeprowadzenia testu odtwarzalności pomiarów

Próbka nowa, suszenie w 120°C pod próżnią, f = 10 Hz, T = 40°C, w = 1%					
Pomiar ( k )	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Próbka 4	Próbka 5
1	0,01288	0,013	0,01269	0,01278	0,01264
2	0,01262	0,01297	0,0127	0,0128	0,01282
3	0,01271	0,01285	0,01275	0,01283	0,01295
4	0,01292	0,01278	0,01295	0,01269	0,01286
5	0,01264	0,01279	0,01284	0,01292	0,01289
6	0,01295	0,01283	0,01287	0,01282	0,01271

7	0,01263	0,01288	0,01282	0,01269	0,01266
8	0,01269	0,01281	0,01265	0,01277	0,01291
9	0,01278	0,01279	0,01296	0,01282	0,01276
10	0,01295	0,01294	0,01294	0,01281	0,01264

Metodologia obliczeń została przeprowadzona analogicznie jak w przypadku analizy powtarzalności pomiarów. Hipotezy testu jednorodności wielu wariancji zakładają odpowiednio:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_3^2 = \sigma_4^2 = \sigma_5^2,$$

$H_1$ : nie wszystkie wariancje wyników są sobie równe.

Wyniki odpowiednich obliczeń przedstawia tabela 10.8

Tabela 10.8. Obliczona odczytana z tabeli rozkładu wartość  $\chi^2$  dla testu jednorodności wielu wariancji

$\alpha$	Stopnie swobody (k-1)	$\chi_{\alpha^2}$	$\chi^2$
0,01	4	13,276704	5,386849

Ponieważ zachodzi nierówność  $\chi^2 = 5,386849 < 13,276704 = \chi_{\alpha^2}$ , to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$  twierzącej, że wszystkie wariancje wyników współczynnika stratności  $tg\delta$  są sobie równe. Hipotezy testu analizy wariancji wielu średnich zakładają odpowiednio:

$$H_0: m_1=m_2=m_3=m_4=m_5$$

$H_1$ : nie wszystkie średnie są sobie równe.

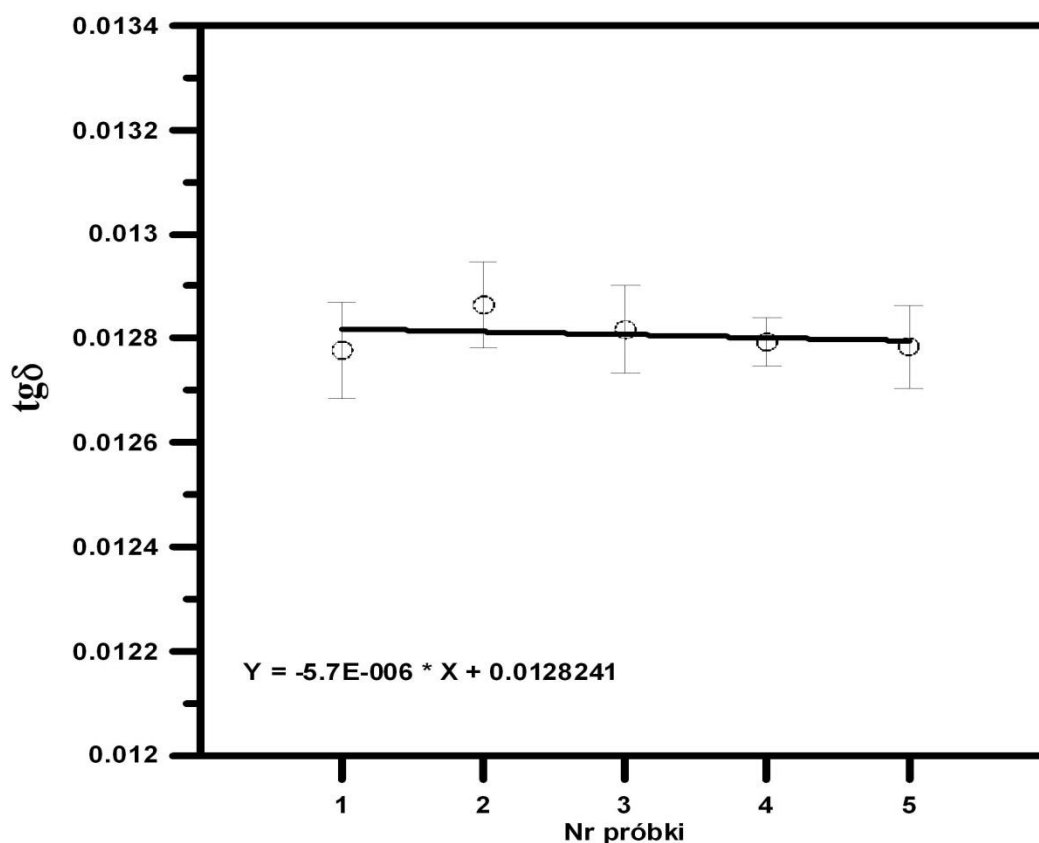
Wyniki odpowiednich obliczeń przedstawia tabela 10.9



Tabela 10.9. Obliczona i odczytana z tabeli rozkładu wartość F dla testu analizy wariancji dla wielu średnich

$\alpha$	1 stopień swobody (k-1)	2 stopień swobody (n-k)	$F_\alpha$	F
0,05	4	45	2,578739	1,095680

Ponieważ zachodzi nierówność  $F = 1,095680 < 2,578739 = F_\alpha$  to nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$  twierzącej, że wszystkie średnie wyników współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  są sobie równe. Dowodzi to jednocześnie, że w wybranym parametrze pomiarowym zachodzi odtwarzalność wyników eksperymentalnych z 5%-ową tolerancją błędów. Na rysunku 10.3 został przedstawiony w sposób graficzny wynik testu.



Rys. 10.3. Odtwarzalność wyników współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$

## 10.2 Podsumowanie badań statystycznych

Wykorzystując parametryczne i nieparametryczne testy istotności dokonano oceny powtarzalności i odtwarzalności wyników pomiarowych.

Na podstawie przeprowadzonych testów eksperymentalnych stwierdzono:

- na podstawie przeprowadzonego testu zgodności  $\chi^2$ , nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$ . Oznacza to, że rozkład wyników współczynnika stratności  $tg\delta$  jest zgodny z typem normalnym,
- ponieważ przeprowadzając test jednorodności wielu wariacji w przypadku powtarzalności i odtwarzalności wyników pomiarowych, zachodzi nierówność  $\chi^2 < \chi_{\alpha}^2$ , więc nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$  twierdzącej, że wszystkie wariacje wyników współczynnika stratności  $tg\delta$  są sobie równe. Na tej podstawie można powiedzieć, że dane pomiarowe wykorzystane do przeprowadzenia testów powtarzalności i odtwarzalności można więc opisać rozkładem normalnym a ich wariację są sobie równe,
- potwierdzenie rozkładu normalnego i równości wariacji pozwalały przeprowadzić test analizy wariacji dla wielu średnich w celu określenia powtarzalności i odtwarzalności wyników eksperymentalnych,
- wartość rozkładu F Snedecora tj. nierówność  $F < F_{\alpha}$  potwierdza, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy  $H_0$  twierdzącej, że wszystkie średnie z wyników współczynnika stratności  $tg\delta$  są sobie równe. Dowodzi to jednocześnie, że w wybranym parametrze pomiarowym zachodzi powtarzalność oraz odpowiednio odtwarzalność wyników eksperymentalnych z 5%-ową tolerancją błędów.

Powyższe obserwacje pozwalają sądzić, że w przypadku pozostałych badanych próbek izolacji celulozowo-olejowej występuje także powtarzalność i odtwarzalność wyników pomiarowych.

## 11. Podsumowanie i wnioski końcowe

Celem pracy było opracowanie nowej metody umożliwiającej szacowanie stopnia degradacji termicznej izolacji celulozowo-olejowej, bazującej na metodzie FDS oraz modelu odpowiedzi dielektrycznej typu Cole-Cole, którą w przyszłości można zaadoptować do celów diagnostyki jakości izolacji olejowych transformatorów energetycznych.

Na podstawie badań eksperymentalnych prowadzonych na próbkach izolacji celulozowo-olejowej oraz analiz charakterystyk dyspersyjnych współczynnika stratności  $\text{tg}\delta$  uzyskanych wynikiem zastosowanej metody FDS, wyciągnięto wnioski:

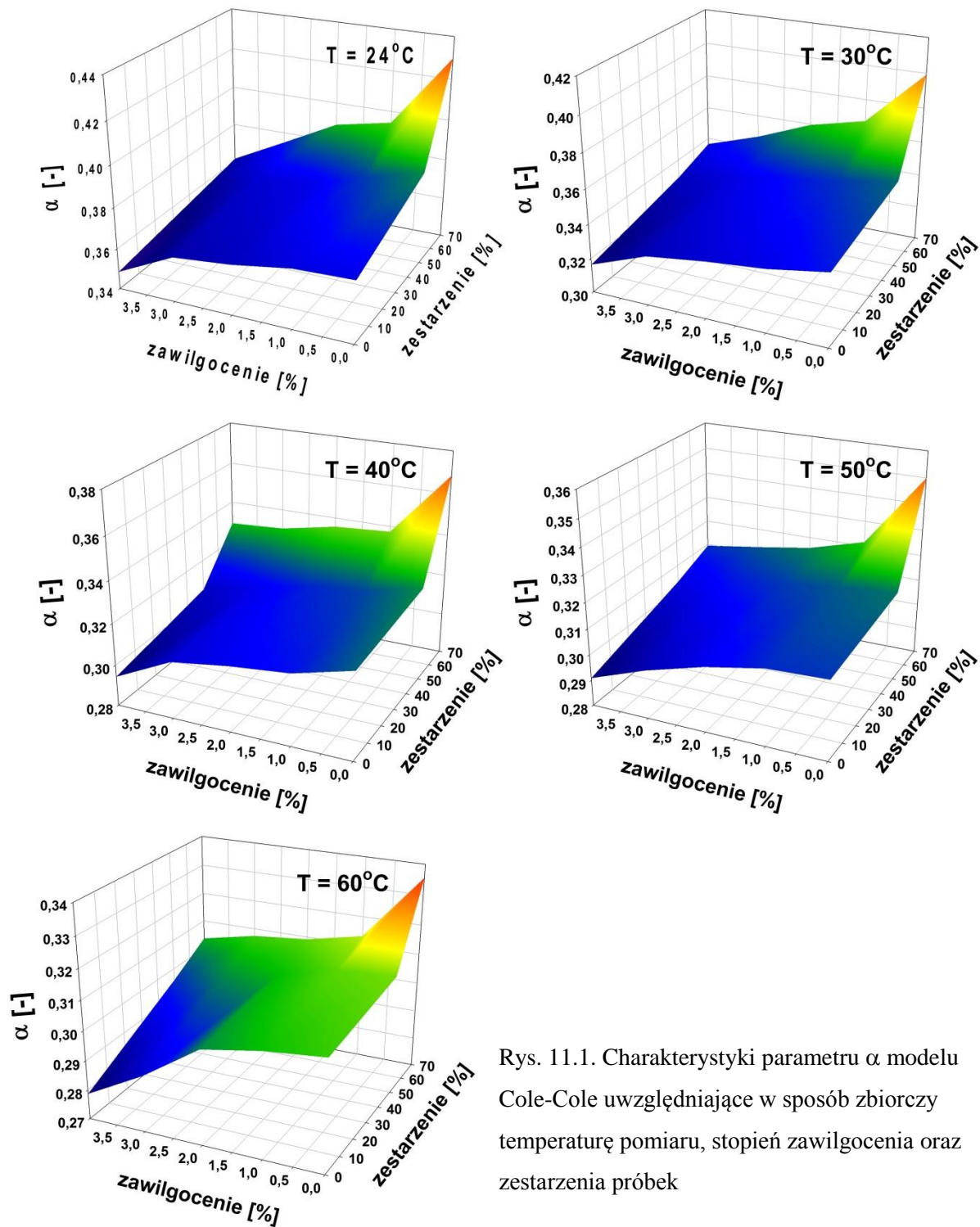
- współczynnik stratności  $\text{tg}\delta$  w funkcji temperatury wzrasta wraz z rosnącą temperaturą pomiaru. Wniosek ten jest szczególnie widoczny w środkowej części charakterystyki, tj. w przedziale częstotliwości od  $10^{-2}$  Hz do  $10^2$  Hz. Główną przyczyną tego zjawiska jest rosnące wraz z temperaturą przewodnictwo oleju izolacyjnego (zgodnie z rys. 4.3, str. 28),
- współczynnik stratności  $\text{tg}\delta$  w funkcji zawilgocenia wzrasta wraz z rosnącym stopniem zawilgocenia celulozy. Jednakże, precyzyjne określenie stopnia zawilgocenia izolacji celulozowo-olejowej jedynie w oparciu o pobieżną analizę charakterystyk  $\text{tg}\delta$  uzyskanych metodą FDS jest praktycznie niemożliwe. W tym celu można jedynie zastosować analizę porównawczą charakterystyki  $\text{tg}\delta$  otrzymanej wynikiem przeprowadzonego badania z charakterystykami  $\text{tg}\delta$  pobranymi z baz danych, które uwzględniają znany stopień zawilgocenia i temperatury eksperymentu. W przypadku diagnostyki stopnia zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych, taką analizę porównawczą umożliwiają elektryczne schematy zastępcze izolacji głównej transformatora,
- współczynnik stratności  $\text{tg}\delta$  w funkcji zesterzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej także zwiększa swoją wartość w miarę utraty stopnia DP makrocząsteczek celulozy. Obserwowane zmiany są jednak w ujęciu ilościowym o wiele mniejsze aniżeli w przypadku analizowanego wpływu stopnia zawilgocenia próbki. Wniosek ten w pełni potwierdzają wyniki badań metodą FDS jakie publikowane są w literaturze przedmiotu, a które pochodzą z eksploatowanych jednostek transformatorowych [135]. Tym samym, prawidłowa ocena stopnia zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej, która opierałaby się jedynie na analizie charakterystyk dyspersyjnych  $\text{tg}\delta$  jest w praktyce

niemożliwa. Zastosowanie elektrycznych schematów zastępczych układów izolacji transformatora, opartych o model Debye'a z wieloma mechanizmami relaksacji również przynosi niewielki skutek.

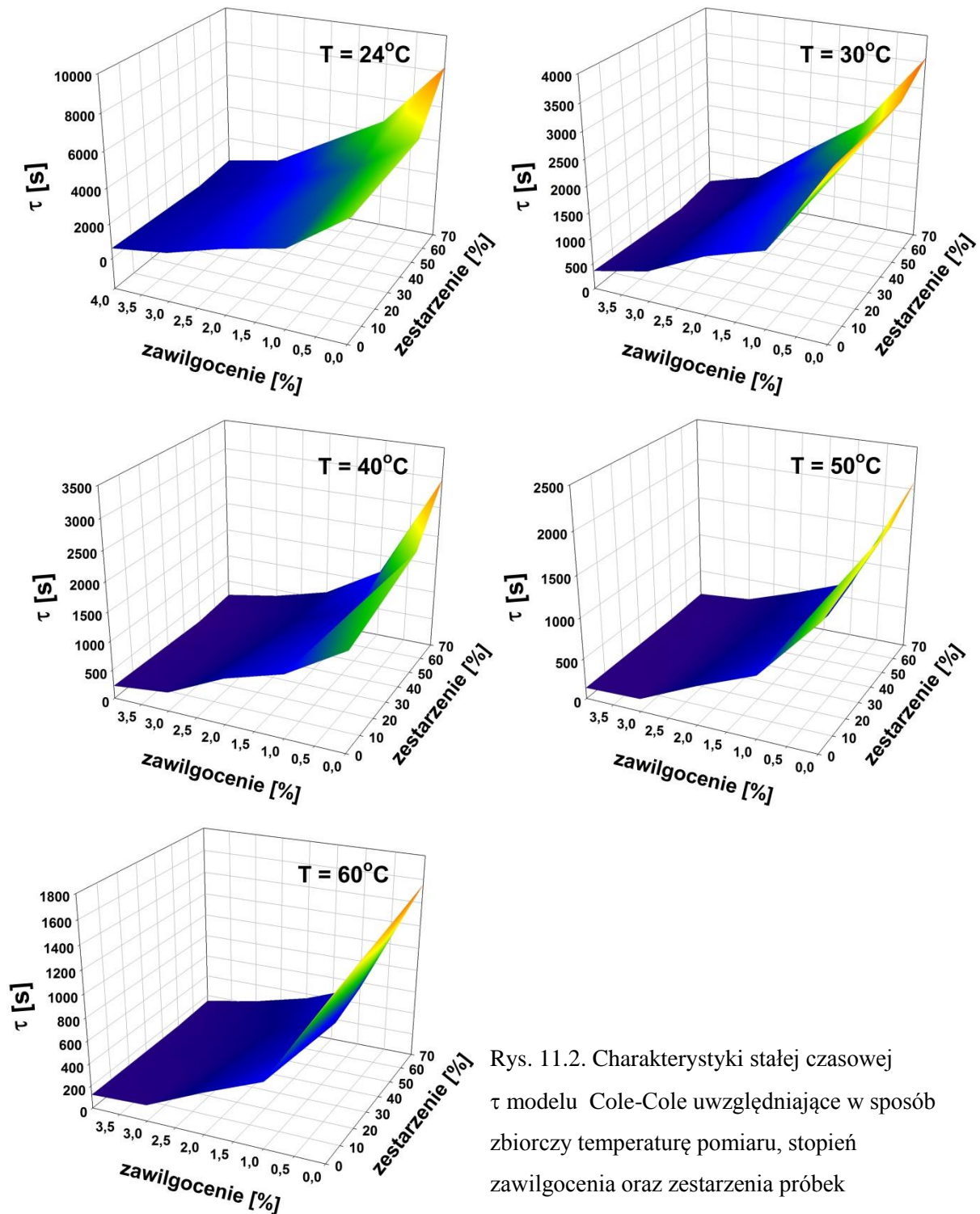
Na podstawie analiz charakterystyk dyspersyjnych pojemności  $C$  próbek izolacji celulozowo-olejowej, uzyskanych z badań laboratoryjnych wykorzystujących metodę FDS, stwierdzić można:

- ogólnie wzrost temperatury powoduje wzrost pojemności, jednakże zaobserwowano, że przy częstotliwościach niższych (tzn.  $\leq 10^{-1}$  Hz), następuje znaczne przyspieszenie wzrostu pojemności izolacji wskutek wzrastającej temperatury. Przeprowadzone analizy dowodzą, że wzrost wartości pojemności następuje niezależnie od stanu jakości izolacji próbki, tzn. stopnia jej zawilgocenia oraz zesterzenia,
- zwiększająca się ilość zgromadzonej wody w próbkach izolacji celulozowo-olejowej powoduje znaczny wzrost pojemności. Zjawisko to szczególnie uwidacznia się przy częstotliwościach niższych (tzn.  $\leq 10^{-1}$  Hz), tak jak w przypadku analizowanego wcześniej wpływu temperatury. Na charakterystykach zaobserwowano, że wzrost wartości pojemności następuje niezależnie od stopnia zesterzenia próbki oraz temperatury pomiaru. Przyczynę zjawiska upatrywać można w znacznej polarności cząsteczek wody, które zwiększają wartość składowej rzeczywistej przenikalności  $\epsilon'$  izolacji, szczególnie w zakresach niskich częstotliwości (tj.  $\leq 10^{-1}$  Hz),
- zaobserwowano, że wzrost stopnia zesterzenia badanej próbki, a co za tym idzie spadek wartości stopnia polimeryzacji DP makrocząsteczek celulozy, powoduje spadek wartości pojemności  $C$ , niezależnie od temperatury wykonywanego pomiaru oraz stopnia zawilgocenia próbki. Zauważono również, że przy częstotliwościach niższych (tj.  $\leq 10^{-1}$  Hz), pojemność nieznacznie zmniejsza swoją wartość. Ostatecznie stwierdzić można, że wzrost stopnia zesterzenia celulozy nieznacznie obniża wartość przenikalności elektrycznej izolacji celulozowo-olejowej. Jednakże fakt ten jest obserwowany jedynie w zakresie częstotliwości niskich (tj.  $\leq 10^{-1}$  Hz) oraz zmiana ta jest trudna w poprawnej weryfikacji w przypadku próbek o dużym stopniu zesterzenia (tj.  $\geq 50\%$  utraty stopnia DP).

Na podstawie wyników pomiarów eksperymentalnych wykonanych metodą FDS, obliczono stałą czasową  $\tau$  oraz współczynnik  $\alpha$  modelu Cole-Cole. Na rysunkach 11.1 i 11.2, przedstawiono w sposób zbiorczy ostateczne zależności parametrów  $\alpha$  i  $\tau$  modelu Cole-Cole, uwzględniające temperaturę pomiaru, stopień zawilgocenia oraz zesterzenia, badanych próbek izolacji celulozowo-olejowej.



Rys. 11.1. Charakterystyki parametru  $\alpha$  modelu Cole-Cole uwzględniające w sposób zbiorczy temperaturę pomiaru, stopień zawilgocenia oraz zesterzenia próbek



Rys. 11.2. Charakterystyki stałej czasowej  $\tau$  modelu Cole-Cole uwzględniające w sposób zbiorczy temperaturę pomiaru, stopień zawilgocenia oraz zesterzenia próbek

Analizując charakterystyki parametru  $\alpha$  modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej stwierdzić można:

- rosnąca temperatura eksperymentu wywołuje niewielki spadek wartości parametru  $\alpha$ . Spowodowane jest to tym, że wartość parametru  $\alpha$  w znacznej mierze zależy

od struktury cząstek dipolowych biorących udział w polaryzacji i z założenia powinna być mniej wrażliwa na zmiany temperatury. Takie przypuszczenia w pełni potwierdziły przeprowadzone badania oraz obliczenia,

- wzrost ilości wody zgromadzonej w próbkach wywołuje spadek wartości parametru  $\alpha$  niezależnie od stopnia zesterzenia próbki i temperatury pomiaru. Dzieje się tak dlatego, że wartość współczynnika  $\alpha$  modelu Cole-Cole zależy przede wszystkim od struktury cząsteczek dipolowych biorących udział w polaryzacji. Jednakże obserwowane zmiany wartości parametru  $\alpha$  modelu Cole-Cole w funkcji zawilgocenia w ujęciu ilościowym są raczej niewielkie. Istotne jest również, że charakterystyki w żadnym punkcie się nie przecinają. Dokonana obserwacja jest o tyle ważna, że pozwala mieć nadzieję na opracowanie w przyszłości odpowiednich tabel współczynników poprawkowych parametru  $\alpha$ , które uwzględnią oddziaływanie stopnia zawilgocenia oraz temperatury,
- analizując wpływ stopnia zesterzenia na parametr  $\alpha$  modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej zaobserwowano, że wskutek zwiększającego się zesterzenia wartość parametru  $\alpha$  istotnie rośnie, niezależnie od stopnia zawilgocenia próbki oraz temperatury pomiaru. Przyczyną tego zjawiska jest fakt, że wzrost zesterzenia próbki izolacji powoduje skracanie długości łańcuchów makrocząsteczek celulozy, tzn. następuje znaczna zmiana struktury budowy wewnętrznej dielektryka, również pod kątem jego własności polarnych. W tym przypadku dokonana obserwacja ma niezwykle istotne, praktyczne znaczenie. Pozwala ona mianowicie sformułować wniosek, że parametr  $\alpha$  modelu Cole-Cole można wykorzystać w metodzie FDS do szacowania stopnia zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej. Uzyskane charakterystyki parametru  $\alpha$  w żadnym punkcie nie przecinają się ze sobą, niezależnie od stopnia zawilgocenia próbki oraz temperatury eksperymentu. Ponadto, obserwowany wzrost wartości parametru  $\alpha$  wraz ze stopniem zesterzenia jest zdecydowanie silniejszy w wyższych temperaturach. Przyczyną może być migrująca z celulozy do oleju w wyższych temperaturach woda, która zmniejsza swój „maskujący” zmiany starzeniowe efekt. W tym miejscu stwierdzić należy, że główna teza pracy, cyt.: „Wykorzystując metody FDS (Frequency Dielectric Spectroscopy) oraz odpowiedzi dielektrycznej Cole-Cole, możliwe jest szacowanie degradacji termicznej próbki izolacji celulozowo-olejowej niezależnie od stopnia jej zawilgocenia oraz temperatury” znalazła swoje eksperymentalne udowodnienie.

Analizując charakterystyki parametru  $\tau$  modelu Cole-Cole próbek izolacji celulozowo-olejowej zaobserwowano:

- parametr  $\tau$  modelu Cole-Cole wraz ze wzrostem temperatury kilkukrotnie zmniejsza swoją wartość. Dzieje się tak, ponieważ wzrost temperatury przeszkadza w porządkowaniu dipoli oraz zwiększa ich chaos, a co za tym idzie zmniejsza się wartość dominującej stałej czasowej procesów relaksacji  $\tau$ ,
- parametr  $\tau$  modelu Cole-Cole wraz ze wzrostem stopnia zawilgocenia badanych próbek znacząco zmniejsza swoją wartość, niezależnie od temperatury pomiaru oraz stopnia degradacji termicznej próbki. Dzieje się tak dlatego, że rosnąca obecność wody w próbkach ze względu swą wysoką polarność, dominuje w spektrum relaksacji cząsteczek dipolowych. Tym samym, stałą czasową  $\tau$  modelu Cole-Cole typową można jako parametr określający stopień zawilgocenia diagnozowanej próbki izolacji. Ważne jest również, że wpływ stopnia zesterzenia w ujęciu ilościowym jest raczej niewielki. W przyszłej diagnostyce ważne będzie natomiast uwzględnianie oddziaływania temperatury na stałą czasową  $\tau$ ,
- parametr  $\tau$  modelu Cole-Cole wraz ze wzrostem zesterzenia (spadek wartości stopnia DP celulozy) zwiększa swoją wartość jedynie dla próbek o niewielkim stopniu zawilgocenia (tj.  $\leq 1\%$ ) oraz szczególnie w zakresie niższych temperatur (tj.  $\leq 40^\circ\text{C}$ ). Stwierdzono, że wzrost zawilgocenia próbek powyżej 1% wywołuje trudne w interpretacji zmiany stałej czasowej  $\tau$  modelu Cole-Cole skutkiem analizowanego wpływu stopnia zesterzenia celulozy. Tym samym, parametr  $\tau$  nie nadaje się do oceny stopnia zesterzenia badanej izolacji szczególnie, że w praktyce izolacja długo eksploatowanych transformatorów energetycznych jest również silnie zawilgocona. Dzieje się tak dlatego, ponieważ woda jest jednym z produktów starzenia celulozy.

Przeprowadzono analizę oddziaływania temperatury, stopnia zawilgocenia oraz zesterzenia próbki celulozowo-olejowej na parametry schematu zastępczego izolacji celulozowo-olejowej wyznaczonego w oparciu o model Cole-Cole. Analizę przeprowadzono na drodze symulacji komputerowej, wykorzystując w tym zakresie metodę napięcia powrotnego RVM.

- analizując charakterystyki napięcia powrotnego zaobserwowano przesuwanie się „czoła” charakterystyk w stronę czasów krótszych w miarę wzrostu temperatury. Przyczyną tego jest wzrost przewodności skrośnej próbek w wyniku wzrastającej temperatury. Kolejnym efektem rosnącej temperatury badanej próbki jest obniżanie się



maksimów napięcia powrotnego. Poczynione obserwacje dowodzą poprawności odpowiedzi napięciowej badanych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej. Przeprowadzone badania i obliczenia wykazały przydatność stosowania zastępczego schematu szeregowo-równoległego, wyznaczonego w oparciu o model Cole-Cole izolacji celulozowo-olejowej, do oceny wpływu temperatury.

- analizując charakterystyki napięcia powrotnego zaobserwowano przesuwanie się maksimów charakterystyk w stronę czasów krótszych w miarę wzrostu stopnia zawilgocenia próbek. Powodem tego jest skracanie się czasów relaksacji dipolowych na skutek rosnącej obecności wody w próbce. Wniosek ten jest typowy, jaki obserwuje się w diagnostyce praktycznej stopnia zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych wykonywanej metodą RVM [83, 145, 147]. Również i w tym przypadku wykonana analiza dowodzi poprawności odpowiedzi napięciowej badanych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej. Jednocześnie wykonane badania i obliczenia wykazały przydatność stosowania zastępczego schematu szeregowo-równoległego, wyznaczonego z modelu Cole-Cole izolacji celulozowo-olejowej, do oceny wpływu stopnia jej zawilgocenia,
- analizując charakterystyki napięcia powrotnego w funkcji zesterzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej zaobserwowano, że proces narastania napięcia powrotnego nieznacznie przesuwa się w stronę czasów krótszych i powoduje obniżanie się maksimów charakterystyk w miarę wzrostu stopnia zesterzenia. Powtarzalność tego procesu zachodzi niezależnie od temperatury pomiaru i stopnia zawilgocenia próbki. Dzieje się tak między innymi dlatego, że wzrost zesterzenia próbki jest raczej słabo powiązany z dominującą stałą czasową relaksacji, która odpowiada czasowi, przy którym charakterystyka osiąga swe maksimum. Obniżanie się maksimów charakterystyk skutkiem wzrostu zesterzenia izolacji wywołane jest najprawdopodobniej powiększającym się rozkładem stałych czasowych mechanizmów relaksacji makrocząsteczek celulozy. W miarę zwiększającego się stopnia zesterzenia makrocząsteczki celulozy rozpadają się na mniejsze, dając tym samym słabszą polaryzację w ujęciu ilościowym. Wykonana analiza, pod kątem zesterzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej dowodzi poprawności odpowiedzi napięciowej badanych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej. Przeprowadzone badanie eksperymentalne oraz obliczenia potwierdziły sensowność wykorzystania zastępczego

schematu szeregowo-równoległego, wyznaczonego z modelu Cole-Cole izolacji celulozowo-olejowej, do oceny wpływu stopnia jej zesterzenia.

Ostatecznie, przedstawione wnioski dotyczące analizy parametru  $\alpha$  w funkcji stopnia zesterzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej potwierdzają słuszność założonej tezy głównej pracy, cyt.: „Wykorzystując metody FDS (Frequency Dielectric Spectroscopy) oraz odpowiedzi dielektrycznej Cole-Cole, możliwe jest szacowanie degradacji termicznej próbki izolacji celulozowo-olejowej niezależnie od stopnia jej zawilgocenia oraz temperatury”. W oparciu o powyższe stwierdzić można, że przyjęta na początku rozprawy główna teza pracy została udowodniona.

Przeprowadzone badanie eksperymentalne oraz obliczenia potwierdziły sensowność wykorzystania zastępczego schematu szeregowo-równoległego, wyznaczonego z modelu Cole-Cole izolacji celulozowo-olejowej, do oceny wpływu temperatury, stopnia zawilgocenia oraz zesterzenia próbek izolacji celulozowo-olejowej. Tym samym druga teza pracy cyt.: „Wykorzystując metodę aproksymacji ziarnistej operatorowej impedancji charakterystycznej oraz model odpowiedzi dielektrycznej Cole-Cole, możliwe jest opracowanie bazy danych elektrycznych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej z uwzględnieniem stopnia ich zawilgocenia, zesterzenia oraz temperatury”, znalazła swe uzasadnienie. Wykonana analiza dowodzi poprawności odpowiedzi napięciowej metody RVM dla badanych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej, co oczywiście potwierdza tezę.

Badania wykonane w ramach rozprawy pozwoliły uzyskać bardzo obszerny zbiór wyników pozwalających opracować bazy danych, które mogą być wykorzystane w przyszłej diagnostyce olejowych jednostek transformatorowych. Zastosowane materiały oraz wartości analizowanych parametrów w pełni odpowiadają wartościom typowym dla eksploatowanych transformatorów energetycznych. Tym samym trzecia teza pracy, cyt.: „Opracowane bazy danych mogą być wykorzystane do analizy porównawczej charakterystyk otrzymanych w diagnostyce olejowych transformatorów energetycznych wykonywanych metodami polaryzacyjnymi”, znalazła swe eksperymentalne udowodnienie.

Problematyka poruszana w rozprawie ma znaczący aspekt praktyczny. Wykonywanie właściwej diagnostyki transformatorów energetycznych jest uzasadnione z ekonomicznego i technicznego punktu widzenia, gdyż stosunkowo małe nakłady na diagnostykę mogą zapobiec bardzo dużym stratom powstałym w wyniku awarii transformatora.

## 12. Problemy otwarte

Pomimo bardzo dobrych rezultatów uzyskanych podczas badań eksperymentalnych, wciąż pozostaje wiele istotnych problemów dotyczących między innymi zachodzących reakcji chemicznych celulozy z mineralnym olejem izolacyjnym podczas eksploatacji jednostki transformatorowej. Należy przeprowadzić badania na różnych olejach, różnych producentów oraz w połączeniu z np. estrami syntetycznymi i naturalnymi.

Ważne jest określenie wpływu temperatury pomiaru, stopnia zawilgocenia oraz zesterzenia izolacji celulozowo-olejowej na eksploatowanych transformatorach mocy ponieważ eksperymentalne badania laboratoryjne były prowadzone jedynie na próbkach izolacji. Porównanie wyników w pełni potwierdzi zaproponowaną metodologię diagnostyczną.

W badaniach wykorzystano model Cole-Cole, którego parametry określono na podstawie metody spektroskopii częstotliwościowej FDS w odniesieniu do izolacji celulozowo-olejowej. Należałoby określić możliwość zastosowania zaproponowanej diagnostyki transformatorów energetycznych również do innego układu izolacyjnego niż papier celulozowy, tzn. połączenie papieru celulozowego i aramidowego lub też samego papieru aramidowego.

Prowadząc diagnostykę terenową metodą spektroskopii częstotliwościowej FDS uwagę również należy zwrócić na wyeliminowanie wpływu zakłóceń zewnętrznych, co pozwoli wykonać poprawnie diagnostykę transformatora.

## 13. Bibliografia

- [1] Adamowicz A. Ocena poprawności odpowiedzi dielektrycznej schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej za pomocą metody napięcia powrotnego, Prace Doktorantów Články Doktorandů, s. 7-11, Opole 2013
- [2] Adamowicz A., Analysis of the Impact of Aging of Temperature and Degree of Capacity ( $C_{iz}$ ) of Loss Factor ( $tg\delta$ ) Insulation Paper-oil, Elektryka z.69 Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, nr 350, s.11-12, Oficyna Wydawnicza Politechnika Opolska, Opole 2013
- [3] Adamowicz A., Repeatability of cellulose-oil insulation samples test results with application of frequency domain spectroscopy, Elektryka z.70 Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, nr 352, s.7-8, Oficyna Wydawnicza Politechnika Opolska, Opole 2014
- [4] Adamowicz A., The diagnostics of a power transformer's paper-oil insulation using the frequency spectroscopy method, Elektryka z.68 Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, nr 347/2012, s.7-8, Oficyna Wydawnicza Politechnika Opolska, Opole 2012
- [5] Adamowicz A., Wpływ temperatury i stopnia zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej na współczynnik stratności ( $tg\delta$ ) oraz pojemności ( $C_{iz}$ ), Prace Doktorantów Články Doktorandů, s. 7-11 Opole 2012
- [6] Adamowicz A., Wykorzystanie elektrycznych schematów zastępczych próbek izolacji celulozowo-olejowej do symulacji charakterystyk napięcia powrotnego, Electrical engineering., Poznan University of Technology Academic Journals, nr 78, s. 113-119, Published by Poznan University of Technology, Poznan 2014
- [7] Alff J., Houhanessian V., Zaengl W.S., Kachler A.J., A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Relaxation Currents Conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, USA , pp. 161-167, 2000
- [8] Badicu L., NOTINGHER P.V., DUMITRAN L., TANASESCU G., POPA D., BATIRG., Thermal Ageing of Oil Impregnated Paper for Power Transformers Insulation Systems, Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, no. 34, ISSN 1842-4805, pp. 7-12, 2010
- [9] Badicu L.V., Notingher P.V., Dumitran L.M., Tanasescu G., Popa D., Use of Dielectric Spectroscopy to Estimate the Condition of Cellulose-Based Insulation, Journal of Electrical and Electronics Engineering, vol. 2, no. 1, pp. 7 –12, 2009
- [10] Baird P.J., Herman H., Stevens G.C., Jarman P.N., Non-Destructive Measurement of Degradation of transformer Insulating paper, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no.1, pp. 309-318, 2006
- [11] Baird P.J., Herman H., Stevens G.C., Jarman P.N., Spectroscopic Measurement and Analysis of Water and Oil in Transformer Insulating Paper, IEEE Trans. Dielect, Electr. Insul., vol. 13, no. 1, pp. 293-308, Feb. 2006
- [12] Bishay S.T., Numerical Methods for the Calculation of Cole-Cole Parameters, Egyptian Journal of Solids, vol. 23, no. 2, pp. 179-188, 2000
- [13] Blennow J., Ekanayake CH., Walczak K., Garcia B., Gubański M, Field Experiences with Measurements of Dielectric Response in Frequency Domain for Power Transformer Diagnostics, IEEE Trans. vol. PWRD-21, nr 2, pp. 681–688

- [14] Boczar T., Wolny S., Współzależność napięcia generacji wyładowań niezupełnych i deskryptorów charakteryzujących impulsy emisji akustycznej, Konferencja Naukowo-Techniczna, Transformatory w Eksploatacji, Sieniawa, s. 167-176, 2003
- [15] Boczar T., Wolny S.: Determining in the Influence of The Factors that Could Disturb Repeatability of the Measurement Results of the EA Pulses Generated by PDs, Physics and Chemistry of Solid State, vol. 5, no.1, , s. 192-196, 2004
- [16] Bolhuis J.P., Gulski E., Smit J.J., Monitoring and Diagnostic of Transformer Solid Insulation, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 17, no.2, pp. 528-536, 2002
- [17] Bródka B., Mościcka-Grzesiak H., Budowa i struktura celulozy w aspekcie procesów degradacji izolacji papierowo-olejowej, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, vol. 4, s.53-56, 2006
- [18] CELIŃSKI Z., Materiałoznawstwo elektrotechniczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1998
- [19] Cichoń A., Ocena stanu technicznego podobciążeniowych przełączników zaczeów metodą emisji akustycznej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, z. 224, 2013
- [20] Cichoń A., Subocz J., Szrot M., Borucki S., Płowucha J., Ocena stanu technicznego transformatorów energetycznych metodą TrafoGrade, Przegląd elektrotechniczny, s. 8-11, 2008
- [21] CIGRE Technical Brochure No. 254, Dielectric Response for Diagnostic of Power Transformers, Paryż 2004
- [22] Clark F.M., Factors Affecting the Mechanical Deterioration of Cellulose Insulation”, AIEE Transactions, vol. 61, pp. 742-749, 1942
- [23] Csepes G., Hamos I., Brooks R., Karius V., Practical Foundations of the RVM (Recovery Voltage Methods for Oil/Paper Insulation Diagnosis), IEEE Conference Electrical Insulation Dielectric Phenomena, vol. 2, pp. 345-355, 1998
- [24] Csepes G., Kispal I., Interpretacja wyników pomiarów metodą RVM stanu zestarzenia i zawilgocenia transformatorów w eksploatacji i po wirowaniu, Energetyka, Zeszyt Tematyczny nr IV, s. 41-45, 2005
- [25] Dakin T.W., Condition a and Polarization Mechanisms and trends in Dilectrics, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 22, no.5, pp. 11-28, 2006
- [26] Dirana, FDS-PDC Dilectric Response Analyzer, Instrukcja obsługi miernika, OMICRON
- [27] Dissado L., Mazzanti G., Montanari G., Elemental Strain and Trapped Space Charges in Thermoelectric Aging of Insulating Materials, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 959–965, 2001
- [28] Dobosz M., Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań, EXIT Warszawa 2004
- [29] DOMBEK G., Nadolny Z., Przybyłek P., Badanie czynników wpływających na zdolność cieczy elektroizolacyjnych do transportu ciepła, Przegląd Elektrotechniczny, nr 10, s. 148-151, 2014
- [30] Du Y., Zahn M., Lesieutre B.C., Mamishev A.V., Lindgren S.R., A Review of Moisture Equilibrium in Transformer Paper-Oil Systems, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.15, no.1, pp. 11-20, 1999
- [31] Duval M., Dukarem J., Improving the Reliability of Transformer Gas-in-Oli Diagnosis, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 21, no. 4, pp. 21-27, 2005
- [32] Dziura J., Spałek D., Cechy szczególne transformatorów optymalnych, VI Konferencja, Transformatory energetyczne i specjalne, Kazimierz Dolny, s. 95–112, 2006

- [33] Ekanayake CH., Graczkowski A., Walczak K., Gubanski S., Dielectric Spectroscopy Measurements on Oli Impregnated Paper/Pressboard Samples, II International Conference APTADM'2004, Wrocław, s. 15-17
- [34] Ekanayake Ch., Gubanski S.M., Graczkowski A., Walczak K., Application of Dielectric Spectroscopy Measurements for Estimating Moisture Content in Power Transformers", KIEE International Transactions on Electrophysics and Application, vol. 4-c (3), pp. 81-90, 2004
- [35] Fabre J., Pichon A., Deteriorating Processes and Products of Paper in Oil, Application to Transformers, CIGRE Conference on Large HV Electric Systems, Paper 137, Paris, 1960
- [36] Farahani M., Borsi H., Gockenbach E., Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain on Insulation System on High Voltage Rotating Machines, 8<sup>th</sup> International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, 2004
- [37] Fleszyński J., Badania mechanizmu przebiecia elektrycznego cieczy izolacyjnych, Zeszyt Naukowy Politechniki Wrocławskiej, 1986
- [38] Florkowska B., Furgał J., Jasiński Ł., Zydrón P., Badania układów izolacyjnych transformatorów metodą napięcia stopniowanego, XI Sympozjum „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia”, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, v. 5, s. 81-83, 2007
- [39] Gafvert U., Frimpong G., Fuhr J., Modeling of Dielectric Measurements on Power Transformers, Internacjonal Conference of Large HV Electric Systems, CIGRE, Paris, no. 15-104, 1998
- [40] Gafvert U., Adeen L., Tapper M., Ghasemi P. Jonsson B., Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Applied to Diagnostic of Power Transformers, 6<sup>th</sup> International Conference Properties and Applications of Dielectric Materials, vol. 2, s. 825-830, 2000
- [41] Gasser H. P., C. Krause, K. Wick, R. Malewski, Dynamiczne przenikanie wilgoci pomiędzy papierem i olejem w izolacji transformatorów, Konferencja – Transformatory Energetyczne i Specjalne, Kazimierz Dolny, 2008
- [42] Gielniak J., Graczkowski A., Moranda H., Mościcka-Grzesiak H., Nadolny Z., Ossowski M., Przybyłek P., Walczak K., Ocena zawilgocenia izolacji papier-olej transformatorów energetycznych z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych oraz fizykochemicznych, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, v.3, s. 112-115, 2005
- [43] Gielniak J., Graczkowski A., MoraNda H., Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., Tatarski L., Bandosz M., Ocena zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, v. 4, s. 84-87, 2006
- [44] Gielniak J., Graczkowski A., Mościcka-Grzesiak H., Czy proces depolimeryzacji celulozy wpływa na odpowiedź dielektryczną układu izolacyjnego papier-olej?, PAK vol. 57, nr 4, s. 397-400, 2011
- [45] Gielniak J., Graczkowski A., Walczak K., Morańda H., Szymański J., Bródka G., Ossowski M., Przybyłek P., Nadolny Z., Mościcka-Grzesiak H., Tatarski L., Bandosz N., Wykorzystanie odpowiedzi dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości w ocenie zawilgocenia izolacji transformatorów energetycznych, VI Konferencja Naukowa – Postępy w Elektrotechnologii, s. 73-76, 2006
- [46] Giselbrecht D., Leibfried T. Modeling of Oil-Paper Insulation Layers in Frequency Domain with Cole-Cole Functions, in Proceeding IEEE International Symposium on Eletrical, Toronto, Canada, 11-14 July 2006

- [47] Graczkowski A., Gielniak J., Influence of Impregnating Liquids on Dielectric Response of Impregnated Cellulose Insulation, 2010 International Conference on Solid Dielectrics, Potsdam, pp. 1-4, 2010
- [48] Graczkowski A., Gielniak J., Przybyłek P., Szymański J., Walczak K., Neuman S.R., Porównanie wyników oceny zawilgocenia izolacji papierowo-olejowej uzyskanych przy użyciu metod fizykochemicznych i opartych na odpowiedzi dielektrycznej, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, v. 4, s. 95-98, 2006
- [49] Graczkowski A., Szymański J., Analysis of the influence of geometrical and material parameters on the recovery voltage spectrum based on an equivalent circuit for paper-oil insulation, Przegląd Elektrotechniczny, pp. 116-119, 1k 2005
- [50] Greń J., Statystyka matematyczna modele i zadania, PWN, Warszawa, 1975
- [51] Gubanski S. M., Boss P., Csepes G., Houhanessian V. D., Filippini J., Guinic P., Gafvert U., Karius V., Lapworth J., Urbani G., Werelius P., Zaengl W. S., Dielectric response methods for diagnostics of power transformers, Electra, no. 202, pp. 23-34, 2002
- [52] Gubanski S.M., Dielectric response methods – for diagnostics of power transformers – on Behalf of Task Force 15.01.09, Electra, no. 202, pp. 25-36
- [53] Gubanski S.M., Boss P., Csepes G., Houhanessian V., Filippini J., Guinic P., Gafvert U., Karius V., Lapworth J., Urbani G., Warelius P., Zaengl W., Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 19, no 3, s. 12-18, 2003
- [54] Hao J., Ma Z., Liao R., Chen G., Yang L., A Comparative Study of Moisture and Temperature Effect on the Frequency Dielectric Response Behaviour of Pressboard Immersed in Natural Ester and Mineral Oil, XVII International Symposium on HV Engineering, Hannover, 2011
- [55] Hassan O., Shayegani A., Boris H., Gockenbach E., Detection of Oil-Pressboard Insulation Aging with Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain, Measurements<sup>th</sup> International Conference on Solid Dielectrics, Toulouse, 2004
- [56] Hioki E.E., Instrukcja obsługi miernika , LCR HiTESTER 3522-50
- [57] Homagk C., Leibfried T. Practical experience on transformer insulation condition assessment in Proc., Int. Conf. Properties Appl. of Dielect. Mater., Bali, Indonesia, 26-30 Jun. 2006, pp. 238-241
- [58] Huang M.R., Li X.G., Thermal Degradation of Cellulose and Cellulose Esters, J. of Applied Polymer Science, vol. 68, pp. 293-304, 1998
- [59] Joshi A., Aaradhi P., Dielectric Diagnosis of EHV Current Transformer Using Frequency Domain Spectroscopy (FDS) & Polarization and Depolarization Current (PDC) Techniques, International Journal of Scientific & Engineering Research, vol. 3, no. 11, pp.1-11, 2012
- [60] Jota P.R.S., Islam S.M., Jota F.G., Modeling the Polarization Spectrum in Composite Oil/Paper Insulation Systems, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 6, no. 2, pp. 145-151, 1999
- [61] Kaźmierski M., Olech W., Pawłowski D., Aktualne problemy zarządzania eksploatacją transformatorów, Energetyka sierpień/wrzesień 2008, Oficyna Wydawnicza Energia COSiW SEP,
- [62] Kędzia J., Wykorzystanie pomiaru stopnia polimeryzacji celulozy do oceny stopnia zesterzenia papieru elektroizolacyjnego przy suszeniu udarowym, Przegląd Elektrotechniczny, s. 162-165, 1971
- [63] Kędzia J., Zagrożenia izolacji transformatorów energetycznych wywołane elektryzacją statyczną, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 1999

- [64] Kispal I., Csepes G., Recovery Voltage Measurement (RVM) Method for Diagnosis of Condition of Oil-Paper Insulation Systems in Power Transformer, Konferencja Naukowo-Techniczna Transformatory w Eksploatacji, s. 199-209, 2003
- [65] KLISTALA T., Przegląd metod diagnostycznych układów izolacyjnych transformatorów dużej mocy w eksploatacji, Konferencja Naukowo - Techniczna: Pomiary i diagnostyka w elektroenergetyce, Pomiary, Automatyka, Kontrola vol. 54, nr 11, str. 754-759, 2008,
- [66] Koch M., Feser K., Reliability and Influences on Dielectric Diagnostic Method to Evaluate the Ageing State of Oil-Paper Insulation, II International Conference APTADM'2004, s. 15-17, 2004
- [67] Koch M., Improved Determination of Moisture in Oil-Paper Insulation by Specialised Moisture Engineering , Beijing, China, 2005
- [68] Koch M., Tenbohlen S., Stirl T.: Diagnostic Application of Moisture Equilibrium for Power Transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 25, no. 4, pp. 2574 – 2581, 2010
- [69] Kováčik J., Šimlaštk J.: Wykrywanie i lokalizacja wewnętrznych źródeł wyładowań niezupełnych w transformatorach mocy, Konferencja Zarządzanie Eksploatacją Transformatorów, Wisła – Jawornik, s. 129 – 140, 2004
- [70] Lawson W.G., Simmons M.A., P.S. Gale, Thermal Aging of Cellulose Paper Insulation, IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-12, no.1, pp. 61-66, Feb. 1977
- [71] Leibfried T., Kachler A. J., Der Houhanessian V., Kuchler A., Breitenbauch B., Ageing and moisture analysis of power transformer insulation systems, CIGRE Session, Paris, pp. 1-6, 2002
- [72] Linhjell D., Lundgaard L., Gafvert U., Dielectric Response of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Aging, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, no. 1, s. 156-169, 2007
- [73] Luszniwicz A., Słaby T., Statystyka z pakietem komputerowym Statistika PL, C.H. Beck, Warszawa 2003
- [74] Łopatkiewicz R., Nadolny Z., Przybyłek P., Sikorski W., The Influence of Chosen Parameters on Thermal Conductivity of Windings Insulation Describing Temperature Distribution in Transformer, Przegląd Elektrotechniczny, nr. 11b, s. 126-129, 2012
- [75] Malewski R., Ferrari S., Duarte J.C., Aramidowa i mieszana izolacja zwiększa obciążalność transformatorów, VII Sympozjum – Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, s. 257-267, 1999
- [76] Malewski R., Subocz J., Szrot M., Płowucha J., Zaleski R., Condition assessment of medium-power transformers using diagnostic methods: PDC, FDS, FRA to support decision to modernize or replace service-aged units, A2-209 CIGRE 2008
- [77] Malewski R., Subocz J., Szrot M., Płowucha J., Zaleski R.: Podstawy oceny opłacalności modernizacji transformatorów, Energetyka, s.884-891, 2006
- [78] McNutt W.J., Insulation Thermal Life Considerations for Transformer Loading Guides, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 1, pp. 392-401, 1992
- [79] Miskiewicz, M., European Electric-Power Systems, comparison of basic data, Elektroenergetyka, vol. 53, nr. 2, pp. 11-43, 2012



- [80] Morais R.M., Engelstein E., Thermal Ageing of Oil-Paper Insulation, IEEE 10<sup>th</sup>, International Conference Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, pp. 495-499, 1990
- [81] Mosiński F., Piotrowski T., Bocheński B.: Zarządzanie czasem życia transformatorów energetycznych za pomocą programów numerycznych, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, s. 157 – 159, 2003
- [82] Mosiński F., Problemy diagnostyki izolacji transformatorów energetycznych, BIULETYN TECHNICZNO-INFORMACYJNY, ISSN 2082-7377, s. 2-14, 2013
- [83] Mościcka-Grzesiak H., Gielniak J., Ossowski M., Czynniki mające wpływ na poprawność wyznaczenia zawartości wody w izolacji papierowej przy wykorzystaniu metody napięcia powrotnego, Energetyka, Zeszyty Tematyczny nr IV, s. 45-48, 2005
- [84] Muzhen S., Guangzhou M., Dielectric Physics, South China University of Technology Press, pp. 115-122, 2000
- [85] Nadolny Z., Analiza i modyfikacja rozkładu pola elektrycznego w wybranych wysokonapięciowych układach izolacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, ISBN 978-83-7143-358-0, Poznań 2007
- [86] Notingher P. V., Materials for Electrotechnics, vol. 1, Politehnica Press, Bucharest, 2005
- [87] Omicron, Instrukcja obsługi miernika Dirana
- [88] Oommen T. V., Petrie E.M., Lindgren R., Bubble Generation in Transformer Winding Under Overloading Condition, G2 Panel Conference of Doble Clients, 1988
- [89] Oommen T.V. Arnold L.N., Cellulose Insulation Materials Evaluated by Degree of Polymerization Measurements, 15<sup>th</sup> Electrical/Electronics Conference, pp. 257-261, 1981
- [90] Oommen T.V., Prevost T.A., Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part II – Maintaining Insulation Integrity and Life, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 22, no. 2, pp. 5-14, 2006
- [91] Oommen T.Y., Moisture Equilibrium Charts for Transformers Insulation Drying Practice, IEEE Trans. on Power App. Systems, vol. PAS-103, No. 10, October 1984.
- [92] Pahlavanpour B., Martins M.A., Depablo A., Experimental Investigation into the Thermal-Ageing of Kraft Paper and Mineral Insulating Oil, IEEE International Symposium Electrical Insulation, pp. 341-345, 2002
- [93] Paraskevas C. D., Vassiliou P., Dervos C. T., Temperature dependent dielectric spectroscopy in frequency domain of high voltage transformer oils compared to physicochemical results, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 13, no. 3, pp. 539-546, 2006
- [94] PN-EN 60296:2012 Materiały Elektroizolacyjne, Ciecze stosowane w elektrotechnice - Świeże mineralne oleje elektroizolacyjne do transformatorów i aparatury łączeniowej
- [95] PN-EN 60641 Materiały Elektroizolacyjne, Preszpan i papier prasowany do zastosowań elektrycznych Część 3-1: Wymagania techniczne dla poszczególnych materiałów
- [96] Porębski J., Korohoda P., PSpice program analizy nieliniowej układów elektronicznych, WNT, 1996
- [97] Prevost T.A., Oommen T.V., Cellulose Insulation in Oil-Filled Power Transformers: Part I –History and Development, IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 22, no. 1, pp. 28 – 35, 2006
- [98] Przybyłek P., Mościcka-Grzesiak H., Influence of Oil-Paper Insulation Ageing Processes on Temperature of Bubble Effect Initiation, III International Conference APTADM'2007, s. 26-28, 2007

- [99] Rapp K.J., Corkran J.L., Gauger G.A., Luksich. J., Aging of paper insulation in natural ester dielectric fluid, IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition, vol.2, pp.675 - 679, 2001
- [100] Rusznak I., Zimmer K., Initial Processes in the Thermolysis of Cellulose Fibres, Proc. Hungarian Textile Conf. 18<sup>th</sup>, vol. 2, pp. 119-139,1971
- [101] Saha T. K., Purkait P., Understanding the impacts of moisture and thermal aging on transformer's insulation by dielectric response and molecular weight measurements, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 15, pp. 568-582, 2008
- [102] Saha T.K., Middleton R., Thomas A., Correlation Between Time and Frequency Domain Polarization Measurements for Transformer Moisture Assessment, AUPEC 2004, Brisbane, pp. 26-29, 2004
- [103] Saha T.K., Purkait P., Investigation of an expert System for the Condition Assessment of Transformer Insulation Based on Dielectric Response Measurements, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, pp. 1127-1134
- [104] Saha T.K., Purkait P., Müller F., An Attempt to Correlate Time & Frequency Domain Polarisation Measurements for the Insulation Diagnosis of Power Transformer, IEEE Power Engineering Society General Meeting, Denver, USA, 2004
- [105] Saha T.K., Purkait P., Muller F., Deriving an Equivalent Circuit of Transformers Insulation for Understanding the Dielectric Response Measurements, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 1, pp. 149-157, 2005
- [106] Saha T.K., Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers, IEEE Trans. on Dielectr. Electr. Insul., vol.10, no 5, pp. 903-917
- [107] Saha T.K., Review of Time-Domain Polarization Measurements for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 4, pp. 1293-1301, 2003
- [108] Saha T.K., Yao Z.T., Experience with Return Voltage Measurements for Assessing Insulation Conditions in Service-Aged Transformers, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 1, pp. 128-153, 2003
- [109] Saha T.K., Yao Z.T., Le T.T., Darveniza M., Hill D.J.T., Investigation of Interfacial Polarization Spectral Parameters for Accelerated Aged Oil-Paper Insulation and Its Correlation with Molecular Weights and Furan Compounds, CIGRE, International Conference Large HV Electrical System, no. 15-201, Paris, 2000
- [110] Scheirs J., Camino G., Avidano M., Tumiati W., Origin of Furanic Compounds in Thermal Degradation of Cellulose Insulation Paper, Journal of Applied Polymer Science, vol. 69, pp.2542-2547, 1998
- [111] Shayegani A., Mohseni H., Borsi H., Diagnostics of Power Transformers with Dielectric Response Measurement, 20<sup>th</sup> International Power System Conference, Teheran, 2005
- [112] Shayegani A.A., GockenBach E., Borisi H., Investigation of the transformation of time domain spectroscopy data to frequency domain data for impregnated pressboard measurement time, Electrica Engineering, vol. 89, no. 1, pp.11-20
- [113] Shayegani A.A., GockenBach E., Borisi H., Mohseni H., The Influence of Aging on Results of Dielectric Spectroscopy on Impregnated Pressboard, 14<sup>th</sup> International Symposium on High Voltage Engineering, Beijing, China, 2005

- [114] Skubis J. Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokonapięciowej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 1998
- [115] Skubis J., Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i monografie, z. 99, Opole 1998
- [116] Skubis J., Metody diagnostyki układów izolacyjnych transformatorów dużej mocy, II Konferencja TWN'99, Kazimierz Dolny, s. 145 – 161, 1999
- [117] Słowikowska H., Słowikowski J., Starzenie cieplne izolacji celulozowej transformatorów olejowych, Transformatory w eksploatacji, Energo-Complex, s. 55-62, 2005
- [118] Słowikowski J., Rola badań diagnostycznych zawilgocenia i zesterzenia izolacji transformatorów, Transformatory w eksploatacji, Wydawnictwo Energo-Complex, s. 75-86, 2005
- [119] Soares S., Ricardo N., Heatly F., Rodrigues E., Low Temperature Thermal Degradation of Cellulose Insulation Paper in Air and Transformer Oil, Society of Chemical Industry, vol. 50 ISSUE, pp. 303-308, 2001
- [120] Subocz J., Dielectric Spectroscopy of Insulation Composite Materials, IEEE 7<sup>th</sup> International Conference on Solid Dielectric, Eindhoven, s. 333-336, 2001
- [121] Subocz J., Gielniak J., Ossowski M., Walczak K., Dielectric Response of Paper-Oil Insulation of Power Transformers, II International Conference APTADM'2004, Wrocław, s. 102-105, 2004
- [122] Subocz J., Malewski R., Szrot M., Płowucha J., Doświadczenia w ocenie stopnia zawilgocenia izolacji transformatorów, Przegląd Elektrotechniczny, Konferencje, s. 241–244, 2006
- [123] Subocz J., Ocena izolacji maszyn WN na podstawie zjawisk relaksacyjnych – pomiary eksploatacyjne, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, v. 3, s. 265-268, 1/2005
- [124] Subocz J., Płowucha J., Zaleski R., Skojarzony pomiar RVM i PDC, Energetyka Zeszyt tematyczny nr XI, s.5-9, 2007
- [125] Subocz J., Starzenie izolacji papierowej, VII Sympozjum – problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia, s. 459-463, Zakopane 1999
- [126] Subocz J., Szrot M., Methods for evaluation of insulation quality using dielectric spectroscopy in frequency and time domains, Przegląd Elektrotechniczny pp. 214-216, 2008
- [127] Subocz J., Szrot M., Estimating the moisture level in paper-oil insulation under advanced aging process, Przegląd Elektrotechniczny 11b, pp. 170-174, 2010
- [128] Subocz J., Transformatory w eksploatacji, Praca zbiorowa, ISBN 978-83-924464-0-8, Energo-Complex, (2007)
- [129] Subocz J., Wpływ temperatury na zjawiska relaksacyjne w izolacji transformatorów, Energetyka, Zeszyt tematyczny nr IV, s. 35-38, 2005
- [130] Subocz J., Wybrane Zagadnienia przewodnictwo i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki izolacji kompozytowej, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Monografia nr. 580, Szczecin, 2003
- [131] Szrot M., Płowucha J., Subocz J.: Planowanie eksploatacji transformatorów z wykorzystaniem systemu TrafoGrade, PAK nr 11, s. 780-782, 2008
- [132] Szymański J., Graczkowski A., Walczak K., Modelowanie matematyczne odpowiedzi dielektrycznej izolacji papier-olej, VI Konferencja Naukowa – Postępy w Elektrotechnologii, Jamrozowa Polana, s. 50-53, 2006

- [133] TFD1.01.10, Brochure 323 – Ageing of Cellulose in Mineral-Oil Insulated Transformers, 2007
- [134] Urbani G.M., Brooks R.S., Using the Recovery Voltage Method to Evaluate Ageing in Oil-Paper Insulation, IEEE 6<sup>th</sup> International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, Vasteras, pp.m 93-97, 1998
- [135] Walczak K., Graczkowski A., Gielniak J., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Ekanyake C., Gubański S., Odpowiedź dielektryczna częstotliwościowa próbek celulozowych w różnym stopniu zawilgoconych i zestarzonych, Przegląd Elektrotechniczny, - Konferencje, v. 4, s. 264-267, 2006
- [136] Walczak K., Graczkowski A., Gielniak J., Neumann S., Gubański S., Mościcka-Grzesiak H., Ocena stopnia zdegradowania izolacji transformatora energetycznego przeznaczonego do kapitalnego remontu przy użyciu różnych metod diagnostycznych, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, vol. 3, s.287-290, 2005
- [137] Wierzbicki J., Ocena stanu transformatorów mocy metoda analizy funkcji przenoszenia (charakterystyki odpowiedzi częstotliwościowej), Energetyka, Zeszyt tematyczny nr XI, s. 55-63, 2007
- [138] Wolny S. Analiza zaniku napięcia powrotnego izolacji papierowo-olejowej, Przegląd Elektrotechniczny – Konferencje, vol. 4, s. 227-275, 2006
- [139] Wolny S., Adamowicz A., Analiza oddziaływania stopnia zawilgocenia oraz temperatury na parametry schematu zastępczego izolacji papierowo-olejowej wyznaczonego w oparciu o model Cole-Cole, Przegląd Elektrotechniczny, nr. 7, s. 315-317, 2013
- [140] Wolny S., Adamowicz A., Lepich M., Influence of Temperature and Moisture Level of Paper-Oil Insulation on the Parameters of the Cole-Cole Model, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 29, no.1, s. 246-250, 2014
- [141] Wolny S., Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, z. 222, 2008
- [142] Wolny S., Kędzia J., Influence of the Cole-Cole Model Parameters on Depolarization Current Characteristics in Paper-Oil Insulation, Przegląd Elektrotechniczny, pp. 291-294, no.11.b, 2010
- [143] Wolny S., Kędzia J., The Application of the Cole-Cole Insulation, III International Conference APTADAM'2007, Wrocław, s. 26-28, 2007
- [144] Wolny S., Lepich M., Adamowicz A., Wpływ stopnia termicznej degradacji papieru aramidowego na jego własności mechaniczne i elektryczne, Prace IEL, z. 261, Warszawa, , s. 77-84, 2013
- [145] Wolny S., Ocena zmian parametrów RVM wyznaczonych za pomocą modelu Debye'a, Energetyka, Zeszyt Tematyczny nr VI, s. 56-58, 2005
- [146] Wolny S., The Application of the Cole-Cole Method in Diagnostics of the Paper-Oil Insulation Using the RVM Method, International Conference Defektoskopie 2007, s. 279-286, 2007
- [147] Wolny S., Zmarzły D., Wpływ temperatury i wilgotności na wybrane parametry napięcia powrotnego izolacji papierowo-olejowej, Energetyka, Zeszyt Tematyczny nr VI, s. 59-61, 2005
- [148] Wolny S., Zdanowski M., Analysis of Recovery Voltages Parameters of Paper-Oil Insulation Obtained from Stimulation Investigations Using the Cole-Cole Model, IEEE Transactions Dielectrics Electrical Insulation, vol. 16, no. 6, pp. 1676-1680 Dec. 2009
- [149] Yao Z.T., Saha T.K., Separation of Ageing and Polarization Measurements, CIGRE Session, pp.15-304, Paris

- [150] Yew J. H., Saha T. K., Thomas A., Impact of Temperature on The Frequency Domain Dielectric Spectroscopy for The Diagnosis of Power Transformer Insulation, Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, pp. 1-7, 2006
- [151] Zaengl W.S., Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for Power Equipment (Transformers, Cables ect.), 12<sup>th</sup> Internacional Symposium on Voltage Engineering – ISH 2001, Bangalore, 2001
- [152] [www.dupont.com/nomex](http://www.dupont.com/nomex)
- [153] [www.sgb-smit.pl](http://www.sgb-smit.pl)
- [154] [www.StatSoft.pl](http://www.StatSoft.pl)
- [155] [www.wordpress.com/papier/wlokno-celulozowe](http://www.wordpress.com/papier/wlokno-celulozowe)