



Politechnika Opolska

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI I INFORMATYKI

Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

Rozprawa doktorska

**Zastosowanie metody PDC do oceny stanu izolacji
aramidowo-olejowej stosowanej w transformatorach
energetycznych dużych mocy**

Autor: mgr inż. Marek Lepich

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

1. WSTĘP	5
2. ZAŁOŻENIA METODYCZNE PRACY	8
2.1. Cel i tezy pracy.....	8
2.2. Zakres rozprawy i przyjęte założenia.....	8
3. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ARAMIDU	10
3.1. Właściwości włókien aramidowych.....	10
3.2. Papier Nomex [®]	12
3.3. Porównanie procesów zawilgocenia papieru aramidowego i celulozowego.....	17
4. IZOLACJA ARAMIDOWO-OLEJOWA	20
4.1. Oleje izolacyjne.....	20
4.1.1. Mineralne oleje izolacyjne.....	21
4.1.2. Estry naturalne i syntetyczne.....	23
4.2. Wytwarzanie izolacji papierowo-olejowej.....	26
4.2.1. Suszenie izolacji aramidowej.....	26
4.2.2. Przygotowanie oleju transformatorowego.....	27
4.2.3. Impregnacja.....	27
5. WŁAŚCIWOŚCI ELEKTRYCZNE DIELEKTRYKÓW	29
5.1. Układy izolacji.....	29
5.2. Zjawiska elektryczne w dielektrykach.....	30
5.3. Energetyczny model przewodnictwa w dielektryku.....	33
5.4. Prądy w dielektryku.....	34
6. DIAGNOSTYKA STANU IZOLACJI PAPIEROWO-OLEJOWEJ ..	38
6.1. Klasyfikacja metod diagnostycznych.....	39
6.2. Polaryzacyjne metody diagnostyczne.....	40
6.2.1. Metoda PDC.....	41
6.2.2. Metoda RVM.....	44
6.2.3. Metoda spektroskopii częstotliwościowej.....	47

7. STARZENIE IZOLACJI STOSOWANEJ W TRANSFORMATO-	
RACH.....	50
7.1. Starzenie mineralnego oleju izolacyjnego.....	50
7.2. Starzenie izolacji stałej transformatora.....	52
7.3. Zmiany parametrów elektrycznych izolacji aramidowej pod wpływem przyspieszonego starzenia.....	53
7.4. Zmiany parametrów mechanicznych izolacji aramidowej pod wpływem przyspieszonego starzenia.....	57
7.5. Skutki procesu przyspieszonego starzenia na strukturę materiału.	59
7.6. Podsumowanie wpływu procesu starzeniowego na izolację stałą...	60
8. BADANIA LABORATORYJNE PRÓBEK IZOLACJI ARAMIDOWO	
-OLEJOWEJ METODĄ PDC.....	62
8.1. Układ pomiarowy.....	62
8.2. Metodologia przygotowania próbek.....	67
8.3. Sposób wykonywania pomiarów.....	72
9. WYNIKI POMIARÓW PRĄDU DEPOLARYZACJI IZOLACJI	
ARAMIDOWO-OLEJOWEJ.....	74
9.1. Analiza wpływu temperatury.....	74
9.2. Analiza wpływu stopnia zawilgocenia.....	77
9.3. Analiza wpływu stopnia zestarzenia.....	80
9.4. Podsumowanie wyników.....	83
10. BADANIA ODTWARZALNOŚCI I POWTARZALNOŚCI WYNI-	
KÓW POMIARÓW.....	85
10.1. Wybrane testy istotności.....	85
10.2. Podsumowanie wyników badań statystycznych.....	94
11. WNIOSKI KOŃCOWE.....	96
12. PROBLEMY OTWARTE.....	100
13. LITERATURA.....	101

WYKAZ OZNACZEŃ

Symbol	Opis	Jednostka
C	pojemność elektryczna	F
C ₀	pojemność geometryczna	F
C _x	pojemność kondensatora wypełnionego dielektrykiem	F
d	odległość między elektrodami	m
DP	stopień polimeryzacji celulozy	-
E	natężenie pola elektrycznego	N/C
E _g	przerwa energetyczna	eV
E _z	zewnętrzne pole elektryczne	N/C
I _a	prąd absorpcji	A
I _{ao}	początkowa wartość prądu absorpcji	A
I _c	prąd ładowania	A
I _{dep}	prąd depolaryzacji	A
I _{po}	prąd polaryzacji	A
I _u	prąd przewodnictwa	A
k	stała Boltzmana $8,62 \times 10^{-5}$	eV/K
R	rezystancja elektryczna	Ω
S	powierzchnia elektrod	m ²
t	czas	s
T	temperatura	°C
t _d	czas depolaryzacji	s
t _p	czas polaryzacji	s
t _z	czas zwarcia	s
U	napięcie	V
U _c	napięcie ładowania	V
Q	ładunek elektryczny	C
tgδ	współczynnik stratności dielektrycznej	-
ε	przenikalność elektryczna dielektryka stratnego	-
ε ₀	przenikalność elektryczna próżni $8,85419 \cdot 10^{-12}$	F/m
ε _r	przenikalność dielektryczna względna	-
τ _r	stała czasowa relaksacji	s
μ	moment dipolowy	-
μ _E	rzut momentu dipolowego na kierunek działania pola elektrycznego	-

1. Wprowadzenie

Mimo szybkiego rozwoju technicznego mającego miejsce w obecnych czasach transformatory energetyczne nadal odgrywają kluczową rolę w układach energetycznych. Dlatego bardzo ważnym aspektem jest poznanie głównych powodów ich awarii, które wiążą się z poważnymi stratami ekonomicznymi związanymi z szybkim przywróceniem zasilania poszczególnych linii energetycznych oraz towarzyszącymi podczas awarii ewentualnymi skażeniami środowiska naturalnego. Dlatego firmy zajmujące się zagadnieniami z dziedziny energetyki poszukują możliwych rozwiązań unikania nieplanowanych wyłączeń transformatorów [76].

Głównym powodem występujących awarii transformatorów jest uszkodzenie izolacji stałej uzwojeń, która dotychczas wykonywana jest zazwyczaj z komponentów celulozowych [12, 35, 51]. Stosowaną celulozę charakteryzuje szereg wad, których eliminacja mogłaby pozwolić na dłuższą, bezawaryjną pracę jednostek transformatorowych. Do najważniejszych wad celulozy należy zaliczyć przede wszystkim stosunkowo niską wytrzymałość temperaturową, której wpływ w wyższych zakresach temperatury powoduje szybkie jej uszkodzenie, a w niższych zakresach znacznie przyspiesza proces jej starzenia. Starzenie izolacji celulozowej pociąga za sobą powstawanie szeregu niekorzystnych zjawisk. Do najważniejszych należą spadek właściwości elektrycznych i mechanicznych materiału oraz powstawanie drobiny wody jako produktu ubocznego rozpadu celulozy. Zwiększenie zawilgocenia izolacji w wyniku eksploatacji transformatora jest częstą przyczyną klasyfikującą transformator do wymiany. Naprawa bądź wymiana izolacji stałej transformatorów dużych mocy w wielu przypadkach jest praktycznie nieopłacalna i rzadko wykonywana [52].

Biorąc pod uwagę powyższe fakty oraz szybko rozwijającą się dziedzinę materiałoznawstwa należy poszukiwać rozwiązań poprzez zastosowanie innych materiałów izolacyjnych pozwalających zastąpić stosowaną dotychczas izolację celulozowo-olejową. Ciekawą oraz coraz częściej pojawiającą się alternatywą dla izolacji celulozowej jest izolacja aramidowa, a w przypadku oleju mineralnego dużym zainteresowaniem cieszą się estry. Nowe materiały często charakteryzują się znacznie lepszymi parametrami od tradycyjnie stosowanych, a rosnąca ich popularność i stosowanie w wielu dziedzinach jest powodem, że ich cena staje się coraz bardziej

dostępna i pozwala na stopniowe wprowadzenie ich do szerszego użycia. Właściwości aramidów pozwalają wyeliminować główne wady występujące w przypadku celulozy tzn. znaczną odporność na oddziaływanie wysokich temperatur, a co za tym idzie znacznie spowolniony proces starzenia się izolacji na skutek temperatur występujących w transformatorze podczas jego eksploatacji. Ponadto brak występowania dodatkowego zawilgocenia podczas rozpadu izolacji oraz znacznie ograniczona absorpcja wody z otoczenia w porównaniu z celulozą, pozwala na eliminację bądź znaczne przesunięcie w czasie głównych czynników eliminujących dany transformator z dalszego użytku [12].

Otwartą sprawą zatem pozostaje nie tylko wyprodukowanie transformatorów z nowym typem izolacji ale także zapewnienie metod diagnostycznych pozwalających na szybką i wiarygodną diagnostykę stanu izolacji stałej. Dla izolacji celulozowo-olejowej istnieje szereg metod pozwalających na diagnostykę jej stanu, natomiast w przypadku coraz częściej stosowanych transformatorów z izolacją aramidowo-olejową tego rodzaju metody są wciąż w fazie badań. W tym miejscu należy wspomnieć, że kluczowym wydaje się również wykonanie tzw. fingerprint'u pozwalającego śledzić zmiany zachodzące podczas eksploatacji w transformatorach.

Celem pracy było empiryczne sprawdzenie możliwości wykorzystania polaryzacyjnej metody PDC w celu diagnostyki transformatorów energetycznych wykorzystujących papier aramidowy jako izolację stałą uzwojeń. W tym aspekcie zaprezentowane wyniki mają cechy badań prekursorskich.

W pracy przedstawione zostały wyniki pomiarów wykonanych metodą PDC w postaci charakterystyk czasowych prądów polaryzacji i depolaryzacji oraz ich interpretacja. Ponadto przedstawione zostały badania przeprowadzone w związku z koniecznością uzyskania wiarygodnej metody umożliwiającej wykonywanie procesu przyspieszonego kontrolowanego starzenia izolacji aramidowej, umożliwiającej uzyskanie izolacji o wskazanej gradacji materiałowej. Wykonano również statystyczną analizę powtarzalności i odtwarzalności prezentowanych wyników badań.

Zakres pracy doktorskiej

Rozdział 2 przedstawia tezy i plan pracy.

Rozdział 3 przedstawia charakterystykę aramidów, zawiera kluczowe informacje o jego właściwościach fizycznych i chemicznych ze szczególnym uwzględnieniem papieru

aramidowego typu Nomex® serii 400 firmy DuPont. Prezentuje również wyniki przeprowadzonego testu porównującego czasy zawilgacania izolacji w formie papieru aramidowego i celulozowego.

Rozdział 4 zawiera opis materiałów stosowanych do wykonywania izolacji papier-syntetyczny olej.

Rozdział 5 przedstawia opis zjawisk fizycznych występujących w dielektrykach stratnych podczas procesów ich polaryzacji i depolaryzacji.

Rozdział 6 zawiera zestawienie metod stosowanych do diagnostyki stanu izolacji w transformatorach z szczególnym uwzględnieniem metod polaryzacyjnych.

Rozdział 7 przedstawia opis przeprowadzonych badań mających na celu wyznaczenie wiarygodnej metody pozwalającej przyspieszyć proces starzenia izolacji z papieru aramidowego, wraz z wynikami zmian właściwości mechanicznych i elektrycznych w wyniku przeprowadzonego procesu przyspieszonego starzenia.

Rozdział 8 zawiera opis układu pomiarowego wykorzystanego w badaniach laboratoryjnych oraz proces wykonywania pomiarów. Przedstawione zostały szczegółowo przyrządy zastosowane do przeprowadzenia badań oraz metodologia przygotowania próbek.

Rozdział 9 przedstawia wyniki badań uzyskane metodą PDC z uwzględnieniem wpływu zawilgocenia i temperatury próbek.

Rozdział 10 zawiera analizę statystyczną pomiarów mającą na celu potwierdzenie powtarzalności i odtwarzalności uzyskanych wyników badań.

Rozdział 11 stanowi podsumowanie otrzymanych wyników badań oraz wnioski końcowe.

Rozdział 12 przedstawia problemy otwarte.

2. Założenia metodyczne pracy

2.1. Cel i tezy pracy

Celem pracy jest opracowanie bezinwazyjnej metody umożliwiającej określenie stopnia degradacji termicznej izolacji stałej transformatora energetycznego wykonanej z aramidu, niezależnie od stopnia jej zawilgocenia oraz temperatury.

Przeprowadzone badania wstępnie pozwoliły autorowi na postawienie następujących tez pracy:

- Możliwe jest opracowanie metody przyspieszonego starzenia termicznego papieru aramidowego, zmieniającej w sposób istotny i powtarzalny podstawowe własności mechaniczne i elektryczne materiału w zakresie odpowiadającym warunkom starzenia naturalnego.
- Wykorzystując metodę PDC (Polarization and Depolarization Current) oraz analizę czasowych charakterystyk prądu depolaryzacji, możliwe jest szacowanie stopnia zawilgocenia i częściowo starzenia próbek izolacji aramidowo-olejowej.

2.2. Zakres opracowania i przyjęte założenia

Plan pracy obejmował m.in.:

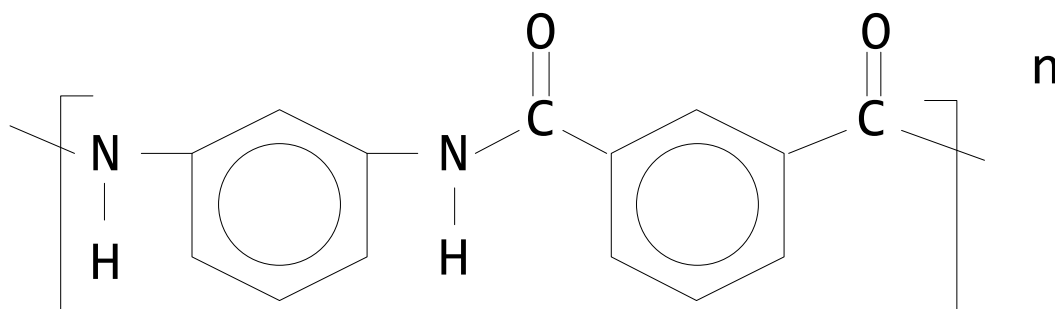
- studia literaturowe w zakresie metod diagnostycznych transformatorów energetycznych ze szczególnym uwzględnieniem metod polaryzacyjnych,
- przygotowanie układu pomiarowego,
- poznanie właściwości izolacji aramidowej poprzez wykonanie serii doświadczeń mających na celu sprawdzenie zmian właściwości elektrycznych i mechanicznych podczas kontrolowanego procesu starzenia termicznego,
- przygotowanie serii próbek izolacji aramidowo-olejowej o kontrolowanym stopniu zawilgocenia oraz degradacji termicznej,

- wykonanie pomiarów metodą PDC (Polaryzation and Depolarization Current), wyznaczenie czasowych charakterystyk prądów depolaryzacji badanej serii próbek,
- wykonanie analizy statystycznej mającej na celu potwierdzenie powtarzalność i odtwarzalność wyników badań,
- analizę danych, opracowanie wyników i sformułowanie wniosków końcowych.

3. Ogólna charakterystyka aramidów

3.1. Właściwości włókien aramidowych

Aramid zbudowany jest ze sztucznych włókien należących do grupy polimerów posiadających wiązania amidowe typu $-C(O)-NH-$. Ich cechą charakterystyczną (w odróżnieniu od np. nylonu) jest występowanie w ich łańcuchach głównych ugrupowań aromatycznych. Niektóre aramidy zawierają między wiązaniami amidowymi tylko grupy aromatyczne, inne zaś zawierają też ugrupowania alifatyczne. Czym więcej w jego strukturze ugrupowań aromatycznych, tym większa odporność mechaniczna, termiczna i pożarowa, ale spada też rozpuszczalność, co powoduje wzrost trudności przy przetwarzaniu.



Rys. 3.1. Budowa chemiczna Nomexu®

Aramid został wynaleziony przez firmę DuPont w 1965 r. pod nazwą H1-1, następnie po kilku latach został wprowadzony na rynek pod nazwą Nomex®. Jego budowę chemiczną przedstawia rysunek 3.1. Ze względu na wybitne właściwości aramidów firma DuPont szybko znalazła wielu konkurentów na całym świecie produkujących tego typu materiał (Teijin-Japonia, Toray-Korea, Yantai Tayho-Chiny itd.).

Włókna aramidowe posiadają szereg charakterystycznych cech odróżniających je od pozostałych włókien syntetycznych czy naturalnych:

- wysoka wytrzymałość (mechaniczna),
- wysoka odporność na ścieranie,

- wysoka odporność na rozpuszczalniki organiczne,
- wysoka rezystywność,
- wysoka temperatura zapłonu,
- bardzo dobre własności izolacyjne,
- brak punktu topnienia.

Te wyjątkowe właściwości wynikają z kombinacji sztywnych cząsteczek polimeru o silnej orientacji krystalicznej, jak również współzależności jaka występuje między łańcuchami polimeru w wyniku obecności wiązań wodorowych.

Przędze z włókien aramidowych wytwarza się poprzez przędzenie na mokro ciekłego roztworu krystalicznego polimeru w stężonym kwasie siarkowym. Po wytłoczeniu przez otwory tłoczne ciekłe włókna przechodzą przez szczeliny z nadmuchem powietrza i wprowadzane są do kąpeli zawierającej wodę w celu ich krzepnięcia. Następnie włókna poddawane są procesowi omywania, neutralizowania, suszenia po czym zostają nawinięte na szpule [113].

Ze względu na swe unikalne właściwości aramid posiada zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu. Z włókien aramidowych produkuje się kamizelki kuloodporne, warstwy zabezpieczające w ubraniach dla strażaków, lotników, kierowców rajdowych i astronautów. Ponadto z aramidów produkuje się pręty, z których konstruuje się maszty jachtów, kije narciarskie i inne elementy wymagające dużej odporności mechanicznej. Aramid znalazł zastosowanie w formie cienkich folii – wprasowanych między inne materiały, tworzących laminaty o wysokiej odporności mechanicznej. Dodatkowo szeroką gałęzią gospodarki stosującą aramid i jego pochodne okazał przemysł energetyczny wykorzystujący jego właściwości w celach wykonywania izolacji elektrycznej w transformatorach, generatorach, silnikach, itp.

3.2. Papier Nomex®

Firma DuPont jako wynalazca aramidów należy do najbardziej znanych i cenionych jego producentów. Zaufanie koncernów energetycznych do produktów tej firmy spowodowało, że papier Nomex® jest często stosowanym materiałem do wykonywania izolacji elektrycznej urządzeń energetycznych, przyczyniając się do wydłużenia żywotności urządzeń energetycznych i zapobiegania przedwczesnym uszkodzeniom. W rodzinie produktów Nomex®, głównie papier i preszpan Nomex® w różnych formach są wysokiej jakości materiałami, rozwiązującymi praktycznie wszelkie wymagania stawiane izolacji elektrycznej.

Nomex® jest polamidem, którego wszystkie grupy amidowe są rozdzielone grupami meta-fenyłowymi, dzięki czemu jego włókna mają właściwości tekstylne. Meta-aramidowe włókna wytwarzane są z metafenylenodwuaminów oraz chlorku izoftaloidu w rozpuszczalniku amidowym. Składają się z atomów węgla, tlenu, azotu i wodoru (rys. 3.1). Papiery Nomex® zbudowane są z mikroskopijnych cząstek włóknistych zwanych fibrydami połączonych krótkimi cząstkami tzw. flokami. Arkusze papieru aramidowego wytwarzane są w płaskositowej maszynie papierniczej w wyniku łączenia flok i fibryd w zawiesinie wodnej. Finalnie materiał poddany jest kalandrowaniu na gorąco, dzięki czemu uzyskuje się papier o większej gęstości oraz lepszych właściwościach elektrycznych i mechanicznych.

Dzięki zastosowaniu papieru Nomex® jako izolacji elektrycznej, począwszy od transformatorów, generatorów turbin wiatrowych i systemów elektrycznych pojazdów hybrydowych (HEV) producenci są w stanie przyczynić się do poprawy spójności i wydajności swoich produktów. To właśnie papier Nomex® odegrał kluczową rolę w umieszczeniu firmy DuPont jako światowego lidera w systemach izolacji elektrycznej, które są stosowane w urządzeniach objętych IEC oraz standardami IEEE.



Rys. 3.2. Papier Nomex®

Papier izolacyjny Nomex® serii 400 – a przede wszystkim 410 – był punktem odniesienia dla pozostałych materiałów izolacyjnych pod względem niezawodności i długowieczności. Wysoka jakość tego produktu oparta jest na pięciu podstawowych cechach:

- wyjątkowa odporność na temperaturę – temperatury do 200°C mają znikomy wpływ na właściwości elektryczne i mechaniczne materiału,
- wyjątkowa wytrzymałość mechaniczna – utwardzony materiał wykazuje się wysoką odpornością na rozdarcia i ścieranie produktu, cieńsze gatunki charakteryzują się dużą elastycznością,
- wytrzymałość elektryczna – zagęszczony produkt wytrzymuje krótkoterminowe napięcia elektryczne od 18 kV/mm do 40 kV/mm, w zależności od rodzaju produktu i grubości,
- zgodność chemiczna – większość rozpuszczalników nie ma na niego negatywnego wpływu, jest nadzwyczaj odporny na działanie kwasów i zasad, jest kompatybilny z wszystkimi klasami lakierów i klejów, płynów transformatorowych, olejów, smarów i chłodziw,
- doskonała odporność na ogień – produkt nie ulega procesowi topienia.

Typowe zastosowanie produktów Nomex® serii 400:

- urządzenia dużej mocy, średniego i wysokiego napięcia (> 1,2 kV),
- urządzenia średniego napięcia – o ograniczonych gabarytach,
- urządzenia niskiego napięcia – specjalnego przeznaczenia,
- urządzenia pracujące w specjalnych warunkach, np. kopalnie, statki,
- specjalistyczne urządzenia spawalnicze.

Typowe właściwości elektryczne papieru Nomex® serii 400 podane przez producenta firmę DuPont w zależności od jego grubości podano w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Typowe właściwości elektryczne papieru Nomex® serii 400

Grubość nominalna (mm)	0,05	0,08	0,10	0,13	0,18	0,25	0,30	0,38	0,51
Wytrzymałość dielektryczna szybki wzrost AC (kV/mm) *	18	22	21	28	34	33	34	33	32
Impuls pełnofalowy (kV/mm) **	39	39	33	55	55	63	N/A	55	55
Stała dielektryczna przy 60 Hz ***	1,6	1,6	1,8	2,4	2,7	2,7	2,9	3,2	3,4
Współczynnik strat przy 60 Hz (x 0,001)***	4	5	6	6	6	7	7	7	7

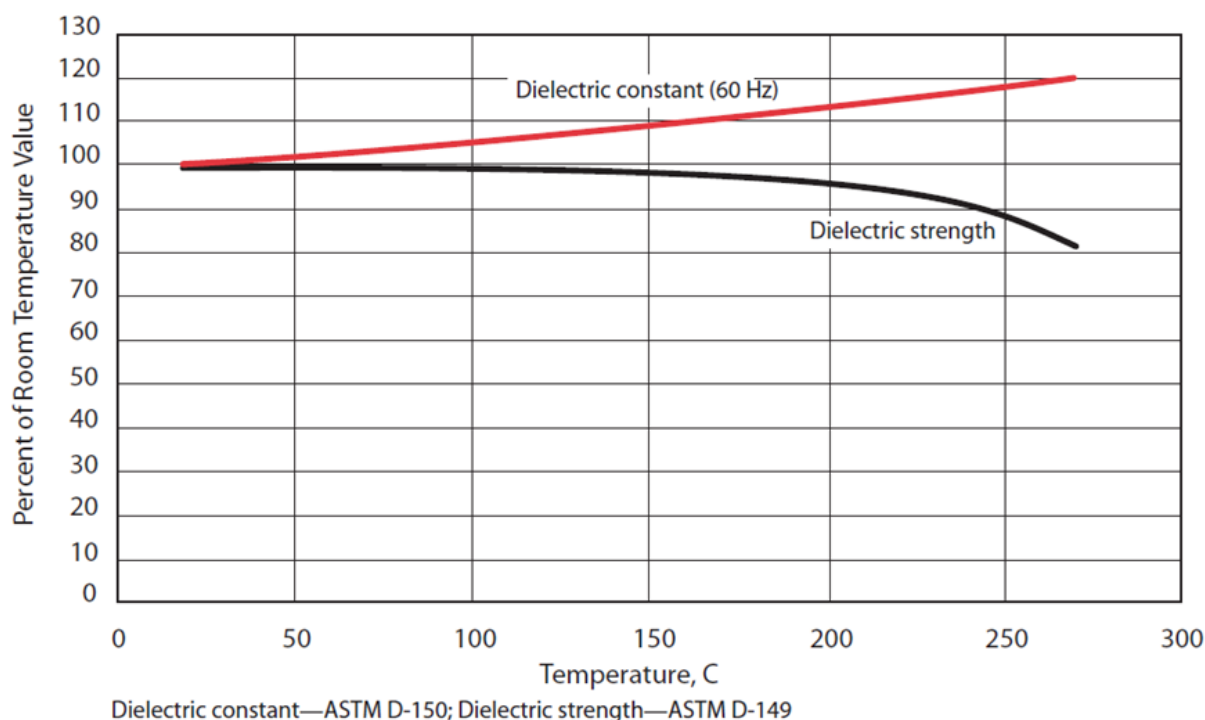
*ASTM D149 (2 calowe elektrody), zgodnie z IEC 60243-1

**ASTM D3426

***ASTM D150

Wpływ temperatury na podstawowe parametry i właściwości papieru Nomex® serii 410 o grubości 0,25 mm podawane przez producenta firmę DuPont prezentują rysunki 3.3, 3.4 i 3.5 [2]. Rysunek 3.3 wskazuje na niski wpływ temperatury na parametry typu: wytrzymałość elektryczna i stała dielektryczna. Jedynie 20% zmiana wytrzymałości elektrycznej oraz przenikalności elektrycznej względnej w stosunku do temperatury 20°C w zakresie zmiany 250°C jest bardzo dobrym wynikiem. Sugeruje to niewielki wpływ temperatury na zjawisko polaryzacji elektrycznej aramidu co jest szczególnie istotne w przypadku diagnostyki izolacji

wykonywanej metodą PDC. Zależność rezystywności skrośnej i powierzchniowej od temperatury przedstawia rysunek 3.4.

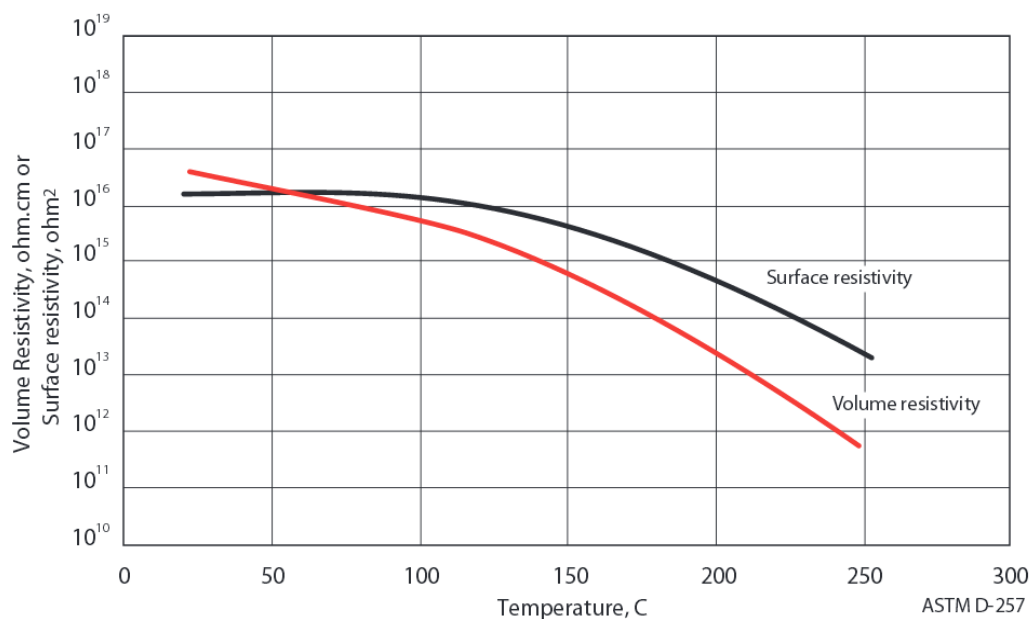


Rys. 3.3. Wpływ temperatury na właściwości elektryczne papieru Nomex® serii 410 o grubości 0,25 mm (przenikalność elektryczna względna, wytrzymałość elektryczna) [112]

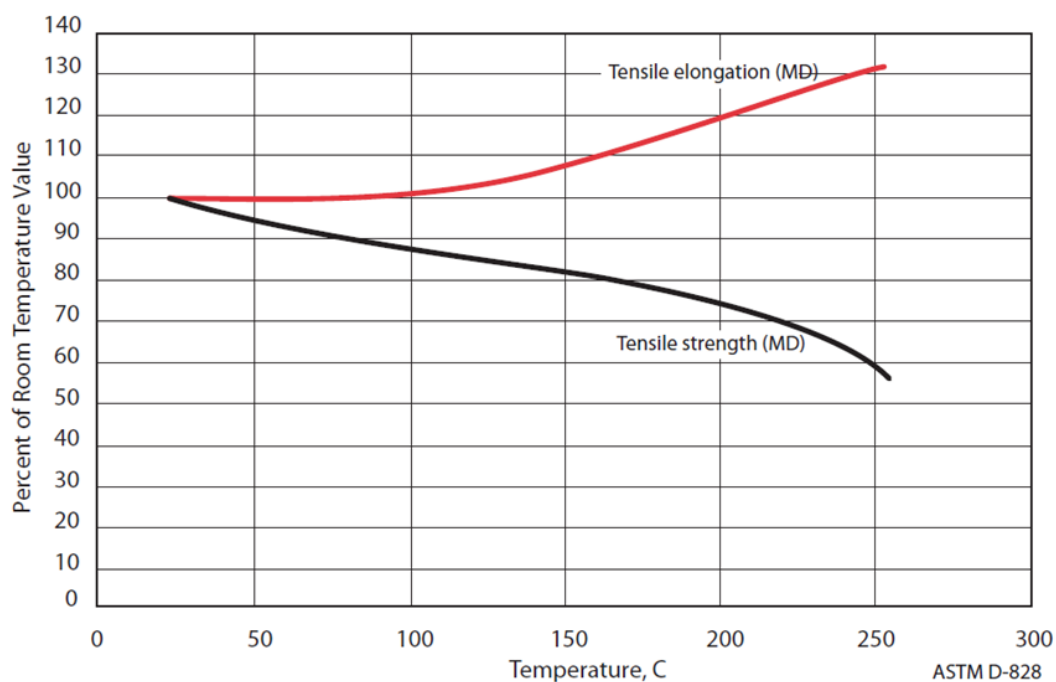
Wzrost temperatury w przedziale od 20°C do ok 250°C pociąga za sobą spadek wartości rezystywności skrośnej i powierzchniowej o kilka rzędów wartości szczególnie widoczny spadek obserwowany jest w przedziałach wyższych temperatur powyżej 120°C. Wpływ temperatury na rezystywność przedstawiono na rysunku 3.4.

Zależność temperatury w odniesieniu do podstawowych parametrów mechanicznych przedstawiono na rysunku 3.5. Wpływ temperatury na właściwości mechaniczne papieru Nomex® w zakresie od 20°C do 250°C jest już niestety znaczny. Wzrost o 30% wydłużenia przy rozciąganiu sugeruje możliwość znacznych zmian w geometrii materiału w wyższych temperaturach. W przypadku izolacji stałej transformatora oznaczałoby to deformację układu. Na szczęście w granicach do 150°C parametr ten rośnie nieznacznie i zmiana nie przekracza 10%. Znacznie bardziej spada wytrzymałości na rozciąganie, osiągając przy 250°C ok . 60% wartości odpowiadającej 20°C. Dowodzi to degradacji termicznej włókien aramidu, tzn.

pękania ich struktury. Powyższe uwagi znalazły w pełni swe odzwierciedlenie podczas opracowania przyspieszonej metody starzenia aramidów, opisanej w dalszej części niniejszej rozprawy.



Rys. 3.4. Wpływ temperatury na rezystywność skrośną i powierzchniową papieru Nomex® serii 410 o grubości 0,25 mm [112]



Rys.3.5. Wpływ temperatury na parametry mechaniczne (wydłużenie przy rozciąganiu oraz wytrzymałość na rozciąganie) papieru Nomex® serii 410 o grubości 0,25 mm [112]

3.3. Porównanie procesów zawilgacania papieru aramidowego i celulozowego

Stałym problemem występującym w transformatorach dużych mocy jest pojawiające się zawilgocenie izolacji wraz z jej starzeniem [97]. Ograniczenie zawilgocenia w izolacji stałej pozwala zmniejszyć negatywny wpływ związany z powstawaniem wyładowań niezupełnych które są powodem lawinowej degradacji izolacji [79]. Papier aramidowy jako materiał higroskopijny w zależności od jego grubości oraz wilgotności otoczenia może osiągnąć do 5 % wilgotności względnej z otoczenia w temperaturze pokojowej.

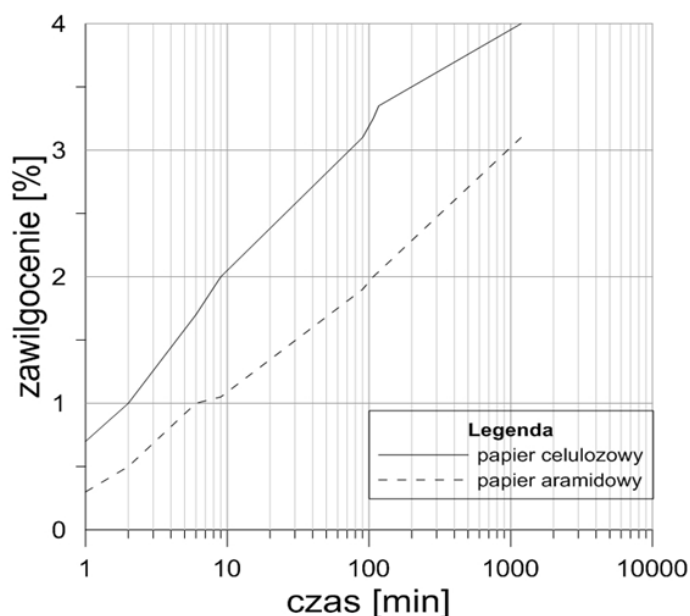
W celu porównania czasów zawilgacania izolacji celulozowej i aramidowej do badania wybrano typową izolację celulozową Tertrans N125 firmy Tervakoski (o grubości 122,9 μm) stosowaną do izolacji uzwojeń transformatorów energetycznych oraz izolację aramidową Nomex® serii 410 firmy DuPont (o grubości 50 μm).

Przygotowane próbki zostały poddane wygrzewaniu w temperaturze 100°C w próżni przez 24h w celu wyeliminowania wilgoci z ich struktury. Tak przygotowane próbki izolacji przyjęto jako zerowe (tzn. o minimalnym zawilgoceniu). Próbki przygotowane w ten sposób zostały wystawione na działanie warunków atmosferycznych w laboratorium:

- temperatura 24,5°C,
- wilgotność względnej powietrza 53%,
- ciśnienie atmosferyczne 1023 hPa.

Następnym krokiem było systematyczne ważenie próbek i porównywanie ich bieżącej wagi do wagi początkowej próbek zerowych. Każdy jednoprocenowy przyrost masy próbki był oznaczony jako wzrost jej zawilgocenia o jeden procent, oraz odnotowany czas, który mierzono od momentu wystawienia próbek na warunki atmosferyczne. Całkowity czas pomiaru (rys. 3.6) wynosił 20 godzin. Zauważono, że papier celulozowy oraz aramidowy zachowywał się podobnie w pierwszych minutach pomiaru, tzn. szybki przyrost masy oznaczał znaczne chłonięcie wilgoci z otoczenia. Jednakże po kilku minutach można było zauważyć początki nasycania się papierów w wyniku czego dalszy proces zawilgacania zaczął spowalniać, aż do momentu w którym drobne zmiany rzędu 1% zawilgocenia dostrzegane były po kilku, a nawet kilkunastu godzinach. Finalnie po 20 godzinach pomiaru uzyskaliśmy zawilgocenie papieru celulozowego rzędu 4%, zaś papieru aramidowego 3,1%. Próby zawilgocenia próbek pokazały, że papier aramidowy oznacza się znacznie lepszymi

parametrami pod względem czasu zawilgocenia (poziom 3% uzyskał po 10 krotnie dłuższym czasie wystawienia na warunki atmosferyczne niż w przypadku badanego papieru celulozowego). Przyczyny zaobserwowanego zjawiska wyjaśnić można analizując strukturę budowy wewnętrznej papieru celulozowego oraz aramidowego. Do celów elektrotechnicznych stosuje się celulozę, która zawiera od 76% do 86% α -celulozy, od 10% do 15% hemicelulozy, od 4% do 8% ligniny oraz 0,2% do 0,8% substancji mineralnych. Tym samym struktura elektrotechnicznego papieru celulozowego jest dość skomplikowana, w wyniku czego może magazynować znaczne ilości cząsteczek wody, maksymalnie do ok. 8% w ujęciu wagowym. W przypadku niestarzonego papieru aramidowego, cząsteczki wody mogą być jedynie magazynowane siłami adhezji na powierzchni włókien aramidu. Stąd wynika jego mniejsza zdolność do magazynowania wody, co jest dla układu izolacyjnego zjawiskiem niewątpliwie korzystnym.

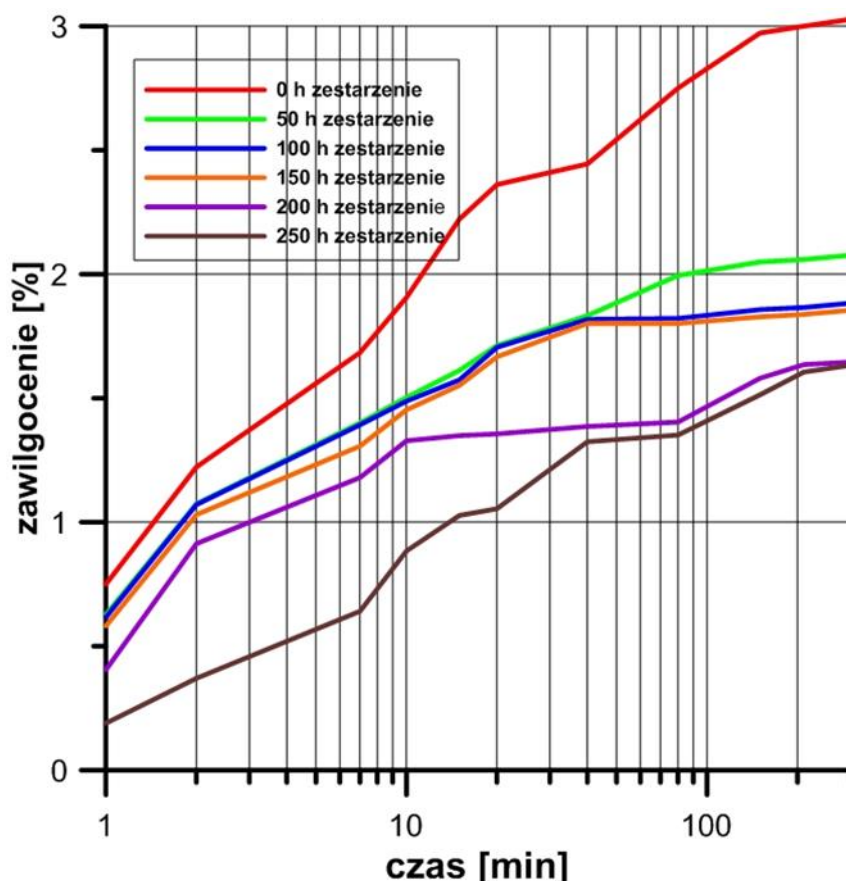


Rys. 3.6. Czas zawilgocenia dwóch typów izolacji stosowanych w transformatorach energetycznych

W celu określenia wpływu stopnia zesterzenia papieru aramidowego na czas jego zawilgacania wykonano eksperyment, w którym próbki o zróżnicowanym stopniu zesterzenia (zgodnie z tabelą 7.3) zostały wystawione na działanie warunków atmosferycznych w laboratorium:

- temperatura 23°C,
- wilgotność względna powietrza 65%,
- ciśnienie atmosferyczne 1020 hPa.

Proces zawilgacania oraz jego rejestracja przebiegała w podobny sposób jak w przypadku procesu porównawczego czasu zawilgocenia papieru aramidowego oraz celulozowego. W wyniku przeprowadzonych badań otrzymaliśmy charakterystyki czasowe przedstawione na rysunku 3.7, które wskazują na wyraźny wpływ procesów starzeniowych na tempo zawilgacania izolacji wykonanej z papieru aramidowego. Czas zawilgacania badanej izolacji wydłuża się wraz z wydłużeniem czasu procesu starzeniowego. Jest to wynikiem wpływu wysokiej temperatury na pojedyncze włókna badanego materiału, które najprawdopodobniej ulegają zlepianiu, co wyraźnie wpływa na mniejszą higroskopijność izolacji wykonanej z papieru aramidowego. Mimo na pozór korzystnego wpływu takiej obróbki termicznej na higroskopijność materiału (co jest szczególnie korzystną cechą w przypadku izolacji stałej transformatorów energetycznych), należy wziąć pod uwagę także pozostałe parametry, które ulegają istotnemu pogorszeniu na skutek procesów starzeniowych, szerzej opisanych w rozdziale 7.



Rys. 3.7. Czas zawilgocenia papieru aramidowego o różnym stopniu zestarczenia termicznego

4. Izolacja aramidowo-olejowa

Zdecydowana większość urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia wykorzystuje układy dielektryków uwarstwionych. Daje to możliwość uzyskania znacznie lepszych właściwości elektroizolacyjnych całego systemu oraz wykorzystania cech poszczególnych jego składników. Ponadto, izolacja dielektrykiem jednorodnym w wielu przypadkach powodowałaby znaczne obniżenie długotrwałej wytrzymałości elektrycznej izolacji, co prowadziłoby do np. wzrostu prawdopodobieństwa występowania wyładowań niezupełnych [8, 92, 107]. Produkowane transformatory w wykonaniu „suchym” (bez stosowania olejów izolacyjnych) charakteryzują się:

- zmniejszeniem wydajności,
- zwiększeniem poziomu hałasu,
- skróceniem żywotności izolacji transformatora (a co za tym idzie całego transformatora).

W transformatrach produkowanych przez ostatnie kilkadziesiąt lat, stosowano głównie izolację celulozowo-olejową. Jednakże ten rodzaj izolacji charakteryzuje się szeregiem wad wynikających z zastosowania materiałów celulozowych cechujących się znaczną podatnością na zjawiska hydroskopijności oraz stosunkowo niską odpornością na wysokie temperatury występujące okresowo w transformatrach, które są głównym powodem przedwczesnego starzenia izolacji. Ostatnie lata wskazują na możliwość stosowania nowych materiałów o znacznie wyższej odporności na temperaturę, takich jak papier aramidowy.

4.1. Oleje izolacyjne

Oleje izolacyjne – zwane również cieczami elektroizolacyjnymi – obejmują przede wszystkim układy izolacyjne transformatorów, łączników elektrycznych, kondensatorów oraz kabli. Dzięki swym właściwościom fizykochemicznym i elektrycznym spełniają w urządzeniach wysokonapięciowych następujące funkcje [27, 31]:

- izolacyjną,

- chłodzącą,
- są środkami chroniącymi przed korozją,
- są czynnikami ułatwiającymi gaszenie łuku elektrycznego,
- poprawiają wytrzymałość izolacji stałych poprzez ich nasycenie,
- substancji chroniącej izolację stałą przed dostępem wilgoci i powietrza.

4.1.1. Mineralne oleje izolacyjne

Oleje mineralne należą do grupy najczęściej stosowanych cieczy dielektrycznych (stosunkowo niski koszt jednostkowy). Ze względu na stosunkowo niską temperaturę zapłonu i palenia należą do grupy materiałów łatwopalnych. Oleje mineralne ulegają powolnemu rozkładowi biologicznemu dlatego podczas rozlania powodują skażenie nasyconych nim warstw gleby i zanieczyszczenie zbiorników wodnych [4, 21, 76].

Produkowane są jako frakcja ropy naftowej odbieranej w przypadku olejów transformatorowych w temperaturze między 300 a 400°C podczas procesu destylacji. W skład transformatorowego mineralnego oleju izolacyjnego wchodzi trzy grupy węglowodorów: nasycone węglowodory naftenowe (C_nH_{2n}), nasycone węglowodory parafinowe (C_nH_{2n+1}), oraz nienasycone węglowodory aromatyczne (C_nH_n i C_nH_{n-2}) [26,54]. Ze względu na procentowy udział poszczególnych grup, rozróżnia się rodzaje ropy: naftenowe (60% węglowodory naftenowe, 25 % węglowodory parafinowe i 15% węglowodory aromatyczne), parafinowe (25% węglowodory naftenowe, 60% węglowodory parafinowe i 15% węglowodory aromatyczne) oraz mieszane (węglowodory naftenowe i parafinowe po 40% oraz 20% węglowodory aromatyczne). Ze względu na temperaturę krzepnięcia oraz koszty produkcji, oleje izolacyjne wytwarza się głównie poprzez destylacje ropy naftowej. Z pozostałych gatunków rop wytwarzanie olejów izolacyjnych także jest możliwe, jednakże pociąga to dodatkowe koszty. Udział węglowodorów aromatycznych ma dwójaki wpływ na parametry oleju izolacyjnego. Z jednej strony poprawia własności gazowe oleju, z drugiej zaś przyspiesza procesy utleniania. Dlatego zawartość węglowodorów aromatycznych waha się w zakresie od 20 do 30% [7, 8, 91].

Mineralne oleje transformatorowe muszą spełniać wymagania normy międzynarodowej PN-EN IEC 60296:2005. Ze względu na przeznaczenie, mineralne oleje izolacyjne dzielą się na [26, 54]:

- a) lekkie oleje naftenowe(transformatorowe),

- U- nieinhibitowane,
- T- zawartość dodatków nie przekracza 0,08%,
- I- zawierające więcej niż 0,08% dodatków.

- b) łącznikowe,
- c) kondensatorowe,
- d) kablowe.

Jakość mineralnych olejów izolacyjnych określana jest poprzez badanie ich właściwości elektrycznych, fizycznych oraz chemicznych. Grupę własności elektrycznych opisują [77]:

- wytrzymałość elektryczna (natężenie przebicia dochodzi do 30 kV/mm),
- współczynnik stratności ($\text{tg } \delta = (3-5) \times 10^{-3}$ przy napięciu przemiennym w temperaturze 90°C),
- przenikalność elektryczna,
- rezystywność.

Właściwości fizyczne są opisane poprzez:

- lepkość kinetyczna (w 40°C ok. 10^{-5} m²/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°C ok. 0,895 kg/cm³),
- poziom zawilgocenia ($\leq 0,03\%$),
- napięcie powierzchniowe (w 20°C ≥ 40 mN/m),
- współczynnik dyfuzji molekularnej (w 20°C $\leq 5 \cdot 10^{-5}$ m²/s),
- klasyfikacja palności (O, $\leq 300^\circ\text{C}$),
- właściwości stabilności gazowej w polu elektrycznym (max +5 mm³/min),
- kolor (klarowny, wolny od osadów i zawiesin).

Właściwości chemiczne są opisane poprzez:

- liczba kwasowa ($\leq 0,01$ mgKOH/g),
- pH wyciągu wodnego (obojętny),
- zawartość 2-furfuralu (2FAL $\leq 0,1$ 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 ($\leq 3\%$).

Do głównych wad olejów mineralnych należą [93]:

- ograniczona odporność na utlenianie,
- stosunkowo niska temperatura zapłonu par oleju,
- tendencję do rozkładu chemicznego i wydzielania gazów (szczególnie pod wpływem wyładowań niezupełnych), występuje zagrożenie wybuchem w obecności powietrza,
- stosunkowo duży współczynnik rozszerzalności cieplnej (konieczność stosowania zbiorników kompensacyjnych),
- ulegają powolnemu rozkładowi biologicznemu (w wyniku rozlania pociągnąć może długotrwałe skażenie środowiska).

4.1.2. Estry syntetyczne i naturalne

Dominującą pozycję wśród płynów izolacyjnych zajmują wciąż oleje mineralne jednakże w związku z wciąż podnoszonymi wymaganiami dotyczącymi bezpieczeństwa pożarowego, ekologicznego oraz trwałości urządzeń energetycznych od początku lat siedemdziesiątych XX wieku zaczęto wdrażać oleje syntetyczne. Jako jeden z pierwszych masowo stosowanych olejów syntetycznych został wdrożony chlorowany dwufenylon (PBC-polichlorobifenyl) [54, 82, 94]. W porównaniu z mineralnymi olejami izolacyjnymi, oleje PCB wykazywały ponad dwukrotnie większą przenikalność elektryczną, niepalność, wyższą odporność cieplną, brak produktów starzenia w postaci osadu oraz niezmienną lepkość i kwasowość podczas eksploatacji. Silne właściwości toksyczne i rakotwórcze oraz bardzo wysoki koszt utylizacji były powodem wycofania z rynku tego produktu. Dlatego w ostatnich latach znacznie wzrosło zainteresowanie innymi płynami izolacyjnymi umożliwiającymi eksploatację urządzeń, które muszą spełniać podwyższone wymagania. Dobrym rozwiązaniem (niestety wciąż bardzo kosztownym) wydaje się stosowanie estrów

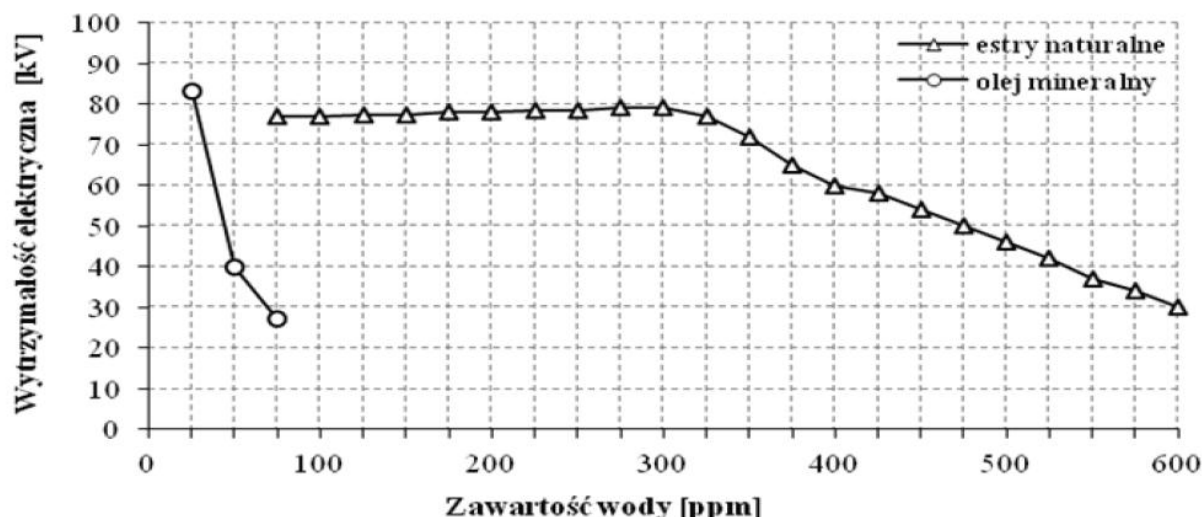
syntetycznych i naturalnych. Parametrami świadczącymi o ich korzystnych właściwościach dla środowiska jest ich wysoka biodegradowalność oraz znacząco wyższa niż dla oleju mineralnego temperatura zapłonu [18, 64]. W tabeli 4.1. przedstawiono typowe wartości tych parametrów dla estrów i oleju mineralnego [71, 80, 81].

Tabela 4.1. Biodegradowalność i temperatura zapłonu olejów elektrotechnicznych

Rodzaj cieczy	Parametry	
	Biodegradowalność [%]	Temperatura zapłonu [°C]
Ester syntetyczny	89	260
Ester naturalny	97	316
Olej mineralny	10	150

Estry naturalne charakteryzują się znacznie wyższą względną przenikalnością elektryczną w porównaniu do oleju mineralnego, która w przypadku estru wynosi 3,2, a dla oleju mineralnego 2,2. Względna przenikalność elektryczna izolacji stałej wynosi zazwyczaj 4 bądź więcej. Im większa różnica względnej przenikalności elektrycznej użytych materiałów tym większa nierównomierność rozkładu natężenia pola elektrycznego, co ma negatywny wpływ na prace urządzenia. Estry naturalne charakteryzują się zarówno wyższą wartością współczynnika strat dielektrycznych ($\text{tg}\delta$) mieszczącą się w zakresie od 0,005÷0,014, która dla oleju mineralnego wynosi 0,002 [16], co jest niewątpliwie negatywnym zjawiskiem wpływającym na procesy starzeniowe urządzeń elektrycznych.

Rysunek 4.2 przedstawia zależność wytrzymałości elektrycznej dla napięcia przemiennego cieczy elektroizolacyjnych w zależności od ich stopnia zawilgocenia. Stosunkowo niewielkie zawilgocenie oleju mineralnego pociąga za sobą lawinowy spadek wytrzymałości elektrycznej, wzrost zawilgocenia z 25 ppm do 75 ppm wpływa na kilkukrotny spadek wartości wytrzymałości elektrycznej. Ze względu na polarną budowę estrów mają one znacznie większą możliwość rozpuszczania wody, dlatego nawet dla zawartości wody rzędu 300 ppm wytrzymałość elektryczna estrów naturalnych pozostaje na stałym, wysokim poziomie.



Rys. 4.1. Wytrzymałość elektryczna wybranych cieczy elektroizolacyjnych w zależności od ich stopnia zawilgocenia [16, 23]

Estry syntetyczne cechuje stosunkowo duża przenikalność dielektryczna – ϵ , co jest wysoce pożądane ponieważ jej wartość jest zbliżona do przenikalności dielektrycznej izolacji stałej w transformatorze. Cechują się także znacznie wyższą lepkością niż olej mineralny, w całym zakresie temperatur. Wysoka wartość współczynnika przewodnictwa cieplnego, tego rodzaju płynu nadaje mu bardzo dobre właściwości w zakresie odprowadzania ciepła z uzwojeń transformatora do otoczenia. Ponadto estry syntetyczne są w pełni mieszalne z mineralnym olejem transformatorowym. Wykazują też dobre właściwości smarne, dlatego mogą być stosowane w transformatorach wyposażonych w konwencjonalne pompy olejowe [36].

Aktualnie obowiązujące standardy dla poszczególnych estrów są następujące:

- estry syntetyczne: norma IEC 60296: 2012 „Ciecze elektroizolacyjne – Wymagania techniczne dla świeżych syntetycznych estrów organicznych do zastosowań elektrycznych,
- estry naturalne: norma ASTM D6871-03:2008 „Standard specification for natural (Vegetable Oil) ester fluid used in electrical apparatus” oraz przewodnik IEEE C57.147-2008 „Guide for acceptance and maintenance of natural ester fluid in transformers”.

4.2. Wytwarzanie izolacji papierowo-olejowej

4.2.1. Suszenie izolacji aramidowej

Wytwarzanie izolacji stałej uzwojeń transformatora z papieru aramidowego jest zbliżone do tradycyjnego wykonania izolacji z papieru celulozowego, ponieważ obydwa rodzaje materiałów charakteryzują się znaczną hydroskopijnością. Poziom zawilgocenia izolacji jaką materiał może przyjąć z otoczenia zależy od wielu czynników, takich jak: temperatura, wilgotność względna oraz czas. Porównanie czasów zawilgacania przykładowych materiałów izolacyjnych dla papieru aramidowego oraz celulozowego opisano w podrozdziale 3.2, a rysunek 3.6. przedstawia wyniki, eksperymentu.



Rys. 4.2. Izolacja stała uzwojeń transformatora mocy wykonana z papieru aramidowego Nomex® serii 410 [24]

Po wykonaniu izolacji stałej uzwojeń transformatora, elementy transformatora podlegają procesowi suszenia w wysokiej temperaturze w celu usunięcia cząsteczek wody i izolacji papierowej (poprzez zerwanie wiązań Van der Waals na skutek wzrostu drgań cieplnych). Szybkość dyfuzji wody do środowiska ponadto jest zależna od różnicy ciśnień między wnętrzem suszonego materiału, a otoczeniem. W celu osiągnięcia minimalnej

wartości wody w izolacji stałej wymaga się stosowania dość wysokiej próżni. Przyjmuje się, że wytworzona próżnia powinna być ok. 10 razy mniejsza od ciśnienia cząstkowego pary wodnej w materiale. Rysunek 4.2 przedstawia przykładowe uzwojenie transformatora z izolacją aramidową.

Sam proces suszenia izolacji aramidowej nowych transformatorów energetycznych jest czasochłonny i dość skomplikowany. Najlepsze efekty otrzymuje się poprzez wykorzystanie metody próżniowego suszenia.

4.2.2. Przygotowanie oleju transformatorowego

Podstawowym zadaniem podczas przygotowania oleju transformatorowego do użycia jest oczyszczenie go z zanieczyszczeń w formie wody. Świeży, prawidłowo przechowywany olej charakteryzuje się zawartością wody na poziomie 20 ppm [17,26,74]. Jest to wartość niedopuszczalna z punktu widzenia jakości produktu finalnego jakim jest transformator.

Do najefektywniejszych sposobów osuszania oleju należy metoda odgazowywania wody pod próżnią. Mimo, iż sama metoda jest prosta, dobór parametrów procesu jest znacznie zróżnicowany w zależności od rodzaju oleju. Zastosowanie wysokiej próżni pozwala nie tylko pozbyć się wody, ale także gazów w nim rozpuszczonych. Osuszony olej przechodzi proces filtracji mający na celu wytrącenie istniejących w nim zanieczyszczeń stałych. Podobny proces osuszania i filtrowania wykorzystuje się także w przypadku olejów eksploatowanych.

4.2.3. Impregnacja

Proces impregnacji izolacji aramidowej transformatorów olejem, przeprowadza się w środowisku próżni (w komorze próżniowej). Procesy przygotowania izolacji aramidowej, olejowej oraz impregnacji przeprowadza się w ściśle skoordynowanym porządku. Zsynchronizowanie tego rodzaju zabiegów sprzyja to, iż z reguły odbywają się na jednym stanowisku.

Tempo procesu impregnacji zależne jest od stopnia wysuszenia izolacji stałej, temperatury oleju oraz wysokości zastosowanej próżni. Zarówno próżnia jak i podwyższona temperatura intensyfikują proces impregnacji. W celu ułatwienia penetracji podczas procesu, stosuje się perforowanie (otwory i ścieżki impregnacyjne). Prawidłowe wykonanie pełnego procesu wpływa na żywotność wyprodukowanego transformatora i jest często wyznacznikiem ich technicznego „czasu życia”.

Mimo wysokiego rygoru podczas produkcji transformatorów, należy się liczyć z obecnością zanieczyszczeń w oleju. Ich szkodliwy wpływ, który mógłby wpłynąć na obniżenie wytrzymałości elektrycznej całego układu izolacyjnego ograniczany jest, w transformatorach poprzez zastosowanie barier izolacyjnych.

5. Właściwości elektryczne dielektryków

5.1. Układy izolacji

Układy izolacyjne urządzeń wysokiego napięcia podczas swej eksploatacji narażone są na oddziaływanie pola elektrycznego mającego wpływ na zmiany powstające w strukturze oraz własności elektryczne dielektryków stosowanych w tych układach [9, 10, 15, 47]. Tego rodzaju pole ma wpływ na występowanie zjawisk: polaryzacji, dyspersji, przewodnictwa i innych, a ich analiza w dziedzinie badań pozwala na klasyfikowanie i dobór materiałów w realnych układach. Prowadzone prace badawcze w obszarze powyższych zjawisk pozwalają na optymalizację w zakresie składu chemicznego, procesu wytwarzania oraz kierunków ewentualnych zmian w budowie i procesach wytwarzania materiałów izolacyjnych. Dodatkowo dostarczają informacji na temat wymagań dotyczących metod oceny układów izolatorów zawierających wskazane rodzaje dielektryków.

Zazwyczaj układy izolacyjne urządzeń energetycznych wykonane są z kilku różnych dielektryków, które tworzą struktury o różnym stopniu uwarstwienia. Komponowanie tego rodzaju połączeń dielektryków podyktowane jest koniecznością uwzględnienia różnej odporności materiałów izolacyjnych na narażenia elektryczne, mechaniczne i cieplne, występujące podczas eksploatacji oraz sterowanie rozkładem pola elektrycznego w celu ograniczenia naprężeń elektrycznych. Głównie widoczne jest to w układach transformatorów, przekładników oraz kondensatorów. Ponadto często o doborze materiału izolacyjnego decydują względy ekonomiczne, pociągające stosowanie tańszych odpowiedników izolacji w miejscach o małym stopniu degradacji bądź w miejscach umożliwiających łatwą ich kontrolę oraz ewentualną wymianę.

Uwarstwiona struktura dielektryków wchodzących w skład urządzeń energetycznych wpływa na charakter zjawisk zachodzących na granicy różnych dielektryków (zjawiska międzyfazowe) oraz specyficzne ich własności, determinują rodzaj i jakość układu izolacyjnego, wskazując jednocześnie na metodykę doboru materiałów wchodzących w skład układu izolacyjnego. Określenie własności powstałych układów izolacyjnych wymaga badań poszczególnych warstw dielektryków oraz przeprowadzenia obliczeń przy zastosowaniu zależności analitycznych lub poprzez wykorzystanie technik numerycznych.

5.2. Zjawiska elektryczne w dielektrykach

Przebieg prądu występujący w dielektryku w wyniku oddziaływania napięcia stałego wynika z szeregu zjawisk fizycznych w których główną rolę odgrywa przewodnictwo jonowe oraz polaryzacja [48, 70]. W przypadku przewodnictwa jonowego w dielektrykach rzeczywistych transport jonów odbywa się pod wpływem wytworzonego pola elektrycznego, gdzie w przypadku napięcia stałego jony dodatnie kierują się w kierunku elektrody ujemnej, zaś jony ujemne w kierunku elektrody dodatniej, a siły pola elektrycznego nadają jonom energię kinetyczną. Zmiany ładunku powstające w wyniku przemieszczania się jonów stanowią prąd upływu. W wyniku zderzeń występujących między jonami, a układem sieci krystalicznej wyzwolona zostaje energia cieplna, przy czym jej strumień określony przez Joule'a i Lenz'a jest proporcjonalny do kwadratu gęstości prądu. Współczynnikiem proporcjonalności jest parametr materiałowy – rezystywność [30].

Wzrost wartości ładunku uzyskujemy poprzez umieszczenie w szczelinie powietrznej między elektrodami dielektryka o strukturze stałej bądź ciekłej (doświadczenie Faradaya) [84]. Pojemność geometryczną uzyskanego kondensatora określamy:

$$C_0 = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad (5.1)$$

Gdzie: C_0 - pojemność kondensatora, Q – ładunek elektryczny, U - napięcie, ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni, S – powierzchnia elektrod, d – odległość między elektrodami.

Pojemność kondensatora wypełnionego dielektrykiem zwiększa się zgodnie z zależnością:

$$C_x = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} = C_0 \epsilon_r \quad (5.2)$$

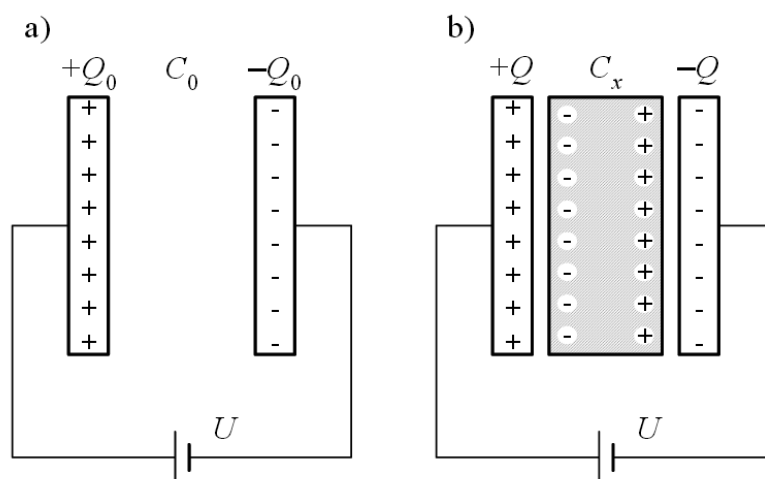
Gdzie: ϵ_r – przenikalność elektryczna względna dielektryka.

Powyższa reakcja związana jest zmianą rozkładu gęstości ładunków w izolacji pod wpływem pola elektrycznego. Poprzez zjawisko formowania się wewnątrz materiału, na powierzchniach przylegających do elektrod ładunków dodatnich i ujemnych.

Umieszczenie materiału dielektrycznego we wnętrzu kondensatora płaskiego przy napięciu stałym, spowoduje przepływ dodatkowych ładunków ze źródła napięcia do kondensatora, dopóki napięcie i wewnętrzne pole elektryczne nie osiągną wartości występujących w kondensatorze próżniowym. Po pełnym spolaryzowaniu dielektryka następuje zatrzymanie dalszego przepływu ładunków. Stopień spolaryzowania układu określany jest wektorem P , który w stanie równowagi jest proporcjonalny do natężenia pola elektrycznego E :

$$P = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (5.3)$$

W wyniku wprowadzenia dielektryka stałego między elektrody kondensatora uzyskujemy neutralizację ładunków na jego elektrodach oraz przepływ dodatkowych ładunków ze źródła napięcia w celu osiągnięcia stanu równowagi, występującego przed wprowadzeniem dielektryka. Proces ten przebiega zarówno przy elektrodzie dodatniej jak i ujemnej, czyli dotyczy dwóch rodzajów ładunków o przeciwnych znakach. Udział ładunków neutralizowanych na elektrodzie jest określany przez przenikalność elektryczną względną charakterystyczną dla danego materiału. Procesy zachodzące w kondensatorze płaskim na skutek wprowadzenia dielektryka między okładziny przedstawia rysunek 5.1.



Rys. 5.1. Polaryzacja dielektryka przy napięciu stałym [82], (a) kondensator próżniowy, brak ładunków indukowanych, (b) kondensator z dielektrykiem ładunki indukowane we wnętrzu dielektryka [65].

W wyniku analizy fizykalnych skutków polaryzacji dielektryków rzeczywistych można określić dwa typy reakcji na przyłożone pole elektryczne. Wpływ pola elektrycznego

na swobodne nośniki ładunków elektrycznych wywołuje ich transport w kierunku sił tego pola. W przypadku dielektryków rzeczywistych jony zawierające nadmiar bądź niedomiar elektronów w powłokach elektronowych są swobodnymi nośnikami ładunków elektrycznych. Przepływ ładunków w wyniku tego procesu objawia się przepływem prądu zwanego prądem upływu.

Wpływ stałego pola elektrycznego objawia się także poprzez orientację elementów posiadających niezerowy wypadkowy moment elektryczny. Zjawisko to występuje praktycznie w pełnym zakresie struktury dielektryka, począwszy od powłok elektronowych i układów cząsteczek dipolowych, do ruchów cząsteczek makroskopowych w tym cząsteczek polimerowych. W przypadku stałego pola elektrycznego orientacja tych elementów stabilizuje się w chwili osiągnięcia stanu równowagi w polu sił elektrostatycznych. Szybkość zmian orientacji elementów zależy głównie od bezwładności polarnych struktur dielektrycznych [46].

Dipole elektryczne, zazwyczaj związane chemicznie ze strukturą amorficzną lub krystaliczną materiału, cechują się znacznie mniejszą dynamiką orientacji ze względu na stosunkowo dużą ich bezwładność. Tego rodzaju orientację określa się jako orientację dipolową. Pod względem szybkości orientacji to chmury elektronowe, które ulegają rozciąganiu na wskutek pola elektrycznego należą do elementów najszybciej orientowalnych. Przyczyną tego jest znikoma bezwładność procesu związana z ich znikomymi masami. Podobnie dipole składające się z jądra atomu i niesymetrycznej powłoki elektronowej, której bezwładność jest także bardzo niewielka, proces ich orientacji przebiega praktycznie „natychmiast”. Procesy szybkiej orientacji elektronowej i atomowej zwane są jako polaryzacja rezonansowa.

Dynamika występujących procesów orientacji zależy także od wewnętrznej energii polarnych elementów struktury, która zależy najczęściej od temperatury (drgań termicznych). Zależność ta jest zwana jako funkcja Langevina i jest określana wzorem:

$$\frac{\mu_E}{\mu} = \text{ctgh}y - \frac{1}{y}x = L(y) \quad \text{dla } y = \frac{\mu E_z}{kT} \quad (5.4)$$

Gdzie: μ_E - rzut momentu dipolowego na kierunek działania pola elektrycznego,

μ – całkowity moment dipolowy, E_z – zewnętrzne pole elektryczne, T – temperatura,

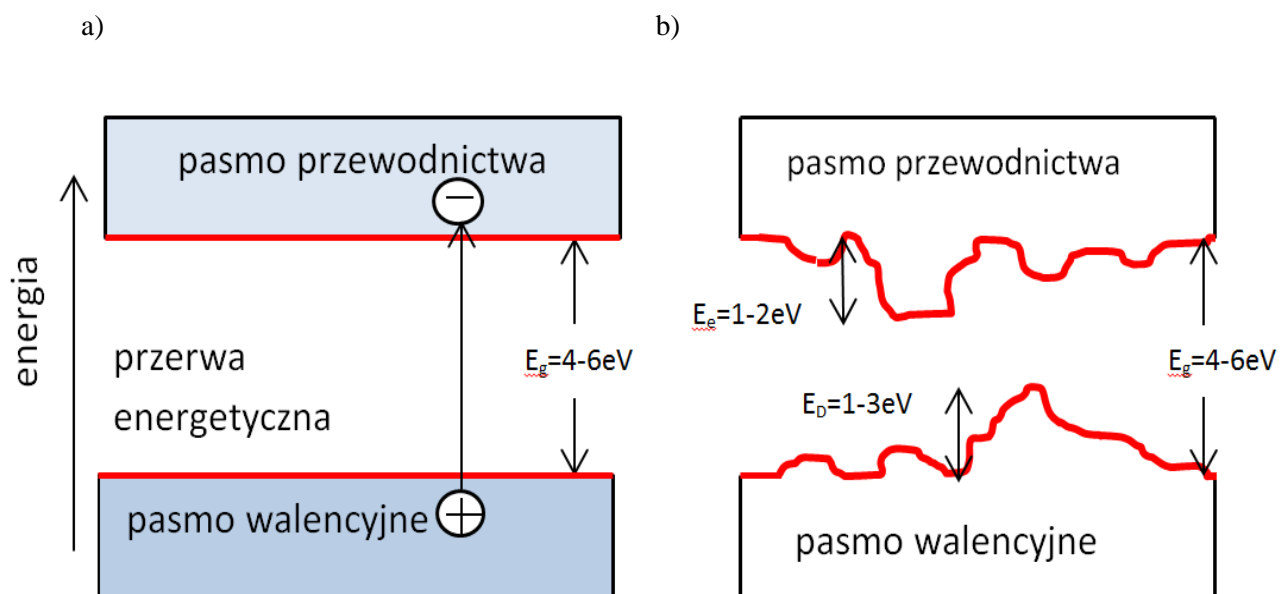
k - stała Boltzmanna.

Przeprowadzone analizy [15, 90] pozwalają stwierdzić, że w zakresie technicznie stosowanych wartości natężeń pól elektrycznych i temperatur, zależność ta jest liniowa.

5.3. Energetyczny model przewodnictwa w dielektryku

Rozpatrując idealny dielektryk należy przyjąć, że wszystkie elektrony walencyjne są silnie związane z atomami, czyli nie mogą przenosić ładunku elektrycznego. W obszarze pasm przewodnictwa i walencyjnego istnieje obszar energii wzbronionej E_g – przerwa energetyczna, wynosząca dla dobrych dielektryków min. 4-6 eV. W celu przemieszczenia elektronów z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa należy wykonać pracę przekraczającą szerokość przerwy energetycznej (rys. 5.2) [40, 41].

Ze względu na występowanie różnych zaburzeń w dielektrykach rzeczywistych, których źródłem zazwyczaj są różnego rodzaju domieszki, zakłócenia stechiometrii, defekty punktowe, różnego rodzaju dyslokacje wewnątrz kryształu oraz powierzchnie graniczne i krawędzie [73]. Z występującymi „nieprawidłowościami” związane są lokalne wartości energii elektronów, scharakteryzowane w modelu pasmowym przez lokalne poziomy energetyczne leżące w przerwie energetycznej (rys. 5.2b). Lokalne poziomy energetyczne stanowią w dielektrykach rolę pułapek nośników prądu elektrycznego, które w istotny sposób ograniczają ruchliwość nośników prądu. Pod wpływem pola elektrycznego nośniki przesuwać się docierając po drodze do pułapek gdzie pozostają uwięzione przez dłuższy okres. W zależności od głębokości pułapki przeniesienie elektronu z poziomu pułapkowego do pasma przewodnictwa wymaga jego termicznej aktywacji energią. Ruch dziur w paśmie walencyjnym przebiega w podobny sposób. Z taką sytuacją mamy do czynienia w przypadku dielektryków amorficznych lub częściowo krystalicznych jakimi są polimery. W tych strukturach zasadniczą rolę odgrywają procesy pułapkowania i rozpraszania nośników prądu. Rozszczepianie się pasm na poszczególne poziomy uniemożliwia ruch elektronów w paśmie. W takim przypadku można przyjąć, że przewodnictwo elektryczne ma naturę hoppingową, polegającym na tym, że elektrony przeskakują od molekuly do molekuly w sposób aktywacyjny [65]. W obszarze molekuł transport nośników odbywa się przede wszystkim wskutek przeskoków między poziomami energetycznymi najslabiej związanych elektronów.



Rys. 5.2. Energetyczny model dielektryka [65]:(a) idealnego, (b) rzeczywistego

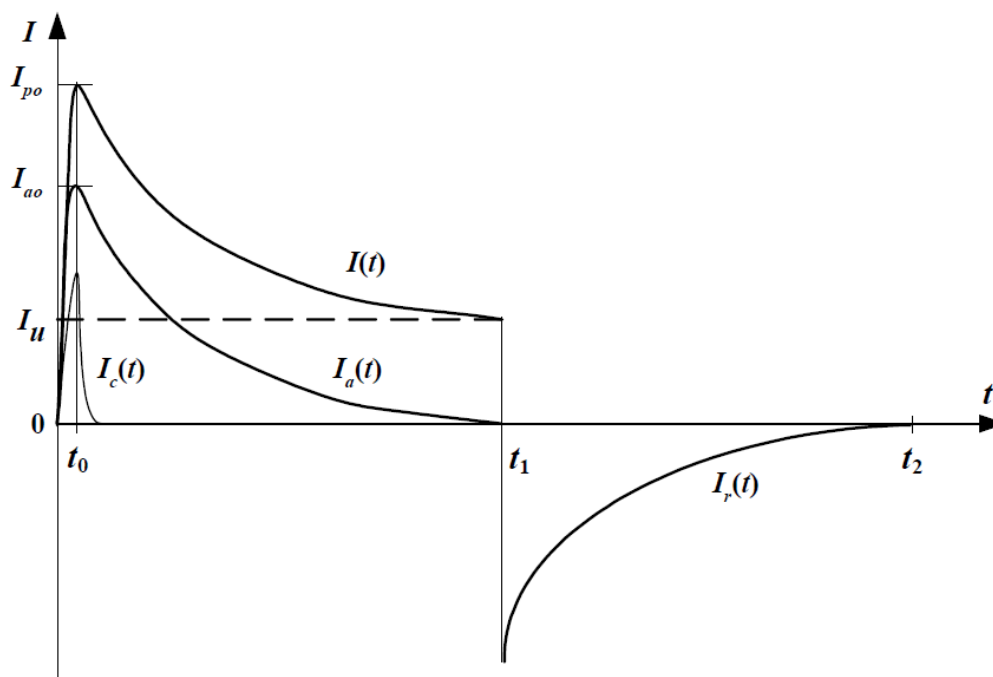
5.4. Prądy w dielektryku

Podłączenie nienaładowanego kondensatora do źródła napięcia stałego, spowoduje krótkotrwały gwałtowny wzrost prądu w obwodzie, aż do wartości maksymalnej I_{po} (rys. 5.3). Następnie wartość prądu maleje do poziomu ustalonego I_u . Prąd płynący przez kondensator $I(t)$ jest sumą trzech prądów: ładowania $I_c(t)$, przewodnictwa I_u i absorpcji $I_a(t)$, co można wyrazić wzorem:

$$I(t) = I_c(t) + I_u + I_a(t) \quad (5.4)$$

Pojawiający się prąd ściśle związany jest z procesami zachodzącymi w dielektryku, prąd ładowania $I_c(t)$ jest związany z polaryzacją sprężystą (jonową i elektronową), jego energia ulega zmagazynowaniu w postaci energii potencjalnej w polu elektrycznym kondensatora [14]. Proces polaryzacji sprężystej zazwyczaj trwa bardzo krótko od 10 do 15 ns, po czym prąd ładowania $I_c(t)$ zanika, osiągając wartość zerową. Prąd przewodzenia I_u spowodowany ruchem ładunków swobodnych (jonów i elektronów), zachowuje stałą wartość

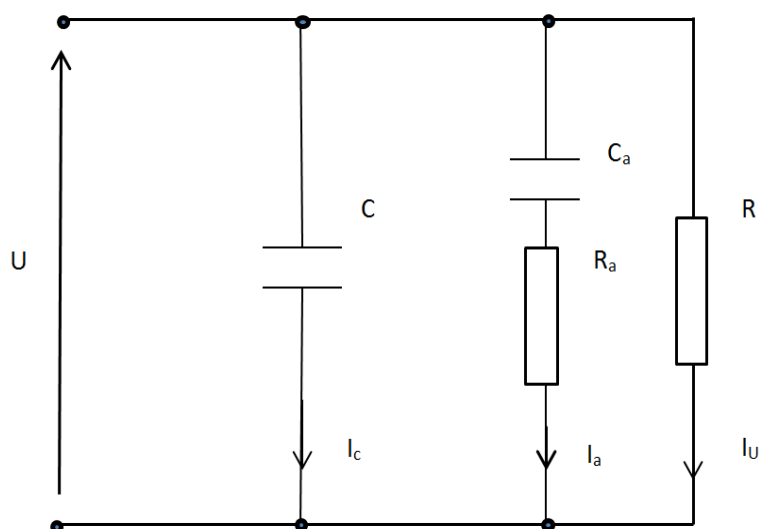
niezależną od czasu t . Prąd absorpcji $I_a(t)$ [83], jest związany z polaryzacją relaksacyjną (orientacją dipoli). Czas polaryzacji relaksacyjnej w zależności od rodzajów dielektryków wynosi od milisekund do kilkunastu godzin [50].



Rys. 5.3. Zależność prądu $I(t)$ płynącego przez dielektryk od czasu przyłożenia napięcia stałego, a następnie po wyłączeniu napięcia i zwarcia próbki: $I_c(t)$ – prąd ładowania, I_u – prąd przewodnictwa, I_a – prąd absorpcji, $I_r(t)$ prąd resorpcji (depolaryzacji) [65]

Energia niesiona prądem absorpcji $I_a(t)$ częściowo zamieniana jest w energię potencjalną pod postacią odkształceń dipoli, a kolejna jej część jest zużyta do pokonania oporów stawianych przez ośrodek obracającym się cząsteczkom dipolowym. Ta część energii zamieniana jest w ciepło w dielektryku. Prąd upływu I_u , wywołany niezerową konduktywnością dielektryka w całości zamienia się w ciepło.

Model zastępczy kondensatora z dielektrykiem o jednej stałej relaksacyjnej przedstawiono na rysunku 5.4 [44, 66].



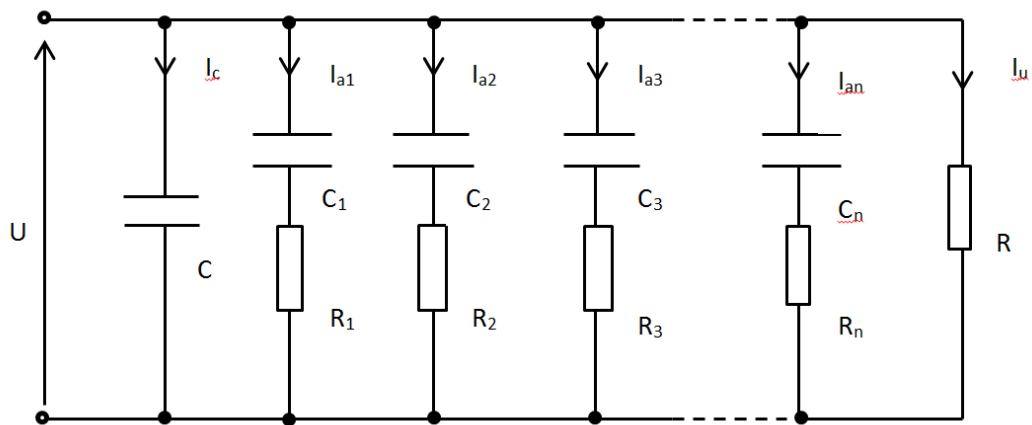
5.4. Schemat zastępczy kondensatora ze stratami w dielektryku o jednej stałej relaksacyjnej

Rysunek 5.4 przedstawia bezstratną pojemność C , która odpowiada pojemności kondensatora próżniowego powiększonej o pojemność odpowiadającą relaksacji sprężystej. Pojemność C_a odpowiada polaryzacji relaksacyjnej, a rezystancja R_a przedstawia straty relaksacyjne. W trakcie polaryzacji sprężystej straty praktycznie nie występują. Rezystancja R odpowiada stratom przewodzenia dielektryka. Schemat kondensatora z dielektrykiem ma tylko jedną gałąź inercyjną C_a i R_a i odpowiada dielektrykowi z jednym tylko rodzajem polaryzacji relaksacyjnej. Prąd w tej gałęzi można przedstawić jako funkcję wykładniczą

$$I_a(t) = I_{a0} \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \quad (5.5)$$

Gdzie: I_{a0} jest wartością początkową prądu I_a , a τ_r – stałą relaksacji.

W rzeczywistym dielektryku układ jest nieco bardziej złożony ze względu na jednoczesne funkcjonowanie wielu mechanizmów relaksacyjnych. Dlatego w celu odwzorowania rzeczywistego dielektryka należy zastosować wiele gałęzi równoległych, szeregowych połączeń C_a i R_a przedstawiających poszczególne stałe czasowe jak na rysunku 5.5 [42, 45].



Rys. 5.5. Schemat zastępczy kondensatora z rzeczywistym dielektrykiem o wielu stałych relaksacyjnych

Zgodnie z rysunkiem 5.5 prąd absorpcji równy jest sumie prądów gałęzi inercyjnych [13, 101]. Wyłączenie źródła zasilania oraz zwarcie elektrod kondensatora spowoduje pojawienie się w obwodzie prądu depolaryzacji (rys. 5.3), który jest zazwyczaj lustrzanym odbiciem prądu absorpcji. Spadek prądu absorpcji oraz quasi-ustalony stan prądu przewodzenia są na ogół uważane za przejaw mechanizmów takich jak [19, 41, 101]:

- polaryzacja elektrod,
- zjawisko pułpkowania ładunku,
- szybka i wolna orientacja dipoli,
- tunelowanie ładunku z elektrody do pustych pułapek,
- wstrzykiwanie ładunku do objętości dielektryka,
- hoppingowanie nośników ładunków.

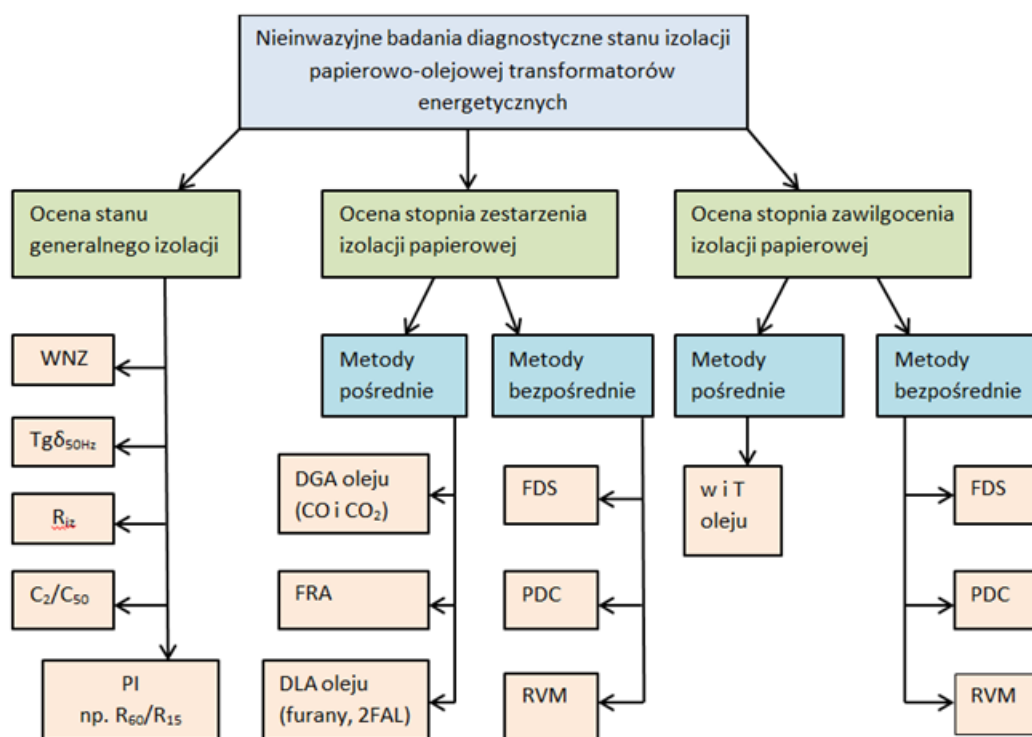
6. Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej

Transformatory tak jak każde inne urządzenia ulegają powolnemu zużyciu. Dlatego od kilkudziesięciu lat przeprowadza się badania mające na celu opracowywanie nowych lub udoskonalanie istniejących metod diagnostyki stanu izolacji w transformatorze. Początki opracowywania metod diagnostycznych spotkały się ze sporymi oporami ze strony środowisk inżynierskich oraz akademickich. Było to spowodowane przekonaniem, że czas życia transformatorów będzie wynosił około 20 lat, po czym będą wymieniane na nowsze „lepsze”, nowocześniejsze jednostki. Jednakże rzeczywistość okazała się nieco inna, gdyż średnia wieku transformatorów energetycznych obecnie eksploatowanych przekracza 30 lat. Spotykane są jednostki, które dzięki prawidłowej eksploatacji pracują już ponad 50 lat. Czynniki te decydują, że już w latach 80 XX wieku dużym zainteresowaniem zaczęły cieszyć się opracowania wyników testów i badań dotyczących diagnostyki transformatorów. Do niedawna badania te głównie skupiały się w ramach tradycyjnych układów izolacyjnych złożonych z papieru celulozowego oraz oleju mineralnego. Jednakże w wyniku zmian zauważanych w ostatnich 20 latach pojawiła się tendencja do zastępowania tradycyjnych materiałów nowymi, często o wiele lepszymi rodzajami izolacji, charakteryzującymi się znacznie lepszymi parametrami elektrycznymi, mechanicznymi oraz pozwalającymi dopełnić wymagań przepisów ochrony środowiska. Badania te zostały rozszerzone o nowe rodzaje stosowanych materiałów izolacyjnych, które często oparte są na sprawdzonych metodach stosowanych na starych układach izolacyjnych. Adaptacje tych metod wymagają przeprowadzenia wielu badań potwierdzających możliwość zastosowania ich do diagnostyki nowych jednostek transformatorowych.

Celem prowadzonych badań jest umożliwienie budowy trwałych transformatorów, zapewniających stałą i bezawaryjną pracę. Opracowywane metody diagnostyczne mają na celu zarówno sprawdzenie poprawności wykonania nowych transformatorów oraz wykonania ich „fingerprint'u”, jak i diagnozowanie stanu degradacji izolacji transformatora, aż do momentu podjęcia decyzji o jego odstawieniu ze względu na zbyt wysokie ryzyko wystąpienia awarii. Dzięki diagnostyce, można przygotować się do planowego wymienienia transformatora, bez ryzyka nagłego odłączenia transformatora, które często związane jest z poważnymi skutkami ekonomicznymi.

6.1. Klasyfikacja metod diagnostycznych

Specyfika pracy i budowy transformatorów energetycznych wymaga stosowania bezinwazyjnych metod diagnostyki transformatorów. Stwarza to poważne utrudnienie dla osób zajmujących się tą tematyką. Głównie związane jest to z koniecznością posiadania szerokiej wiedzy praktycznej i teoretycznej związanej z budową transformatora oraz tematyką procesów chemicznych, fizycznych zachodzących podczas jego eksploatacji. Kolejnym problemem jest konieczność stosowanie równocześnie kilku metod badawczych w celu uwiarygodnienia uzyskanych wyników [29, 88].



Rys. 6.1. Wykaz metod diagnostycznych stanu izolacji papierowo-olejowej transformatorów energetycznych [107];

WNZ – metoda analizy poziomu wyładowań niezupełnych,
 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,
 Riz – rezystancja izolacji uzwojeń,
 PI – wskaźnik polaryzacji, R60 i R15 – rezystancje po upływie 60 i 15 sekund pomiaru,
 C2/C50 – wskaźnik pojemnościowy, pojemność uzwojenia przy 2 i 50 Hz napięcia pomiarowego.

Kluczowym zagadnieniem pozostaje posiadanie wcześniej uzyskanych wyników pomiarowych pozwalających śledzić zakres i tempo procesów występujących w badanym urządzeniu. Dlatego w praktyce przedsiębiorstwa energetyczne zlecają tego rodzaju badania specjalistycznym firmą zewnętrzną.

Powyższe warunki stanowią, że tematyka diagnostyki stanu izolacji transformatorów należy do dość drogiego przedsięwzięcia, jednakże koszty poniesione w ramach szeroko rozumianej prewencji są znacznie niższe niż ewentualne koszty nieprzewidzianych awarii.

Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej polega na oznaczeniu stopnia zawilgocenia oraz zesterzenia papieru izolacyjnego, tzn. uzyskaniu informacji o jego procentowym stopniu degradacji [28].

6.2. Polaryzacyjne metody diagnostyczne

W diagnostyce stanu izolacji stałej transformatora metody polaryzacyjne cieszą się wciąż niesłabnącą popularnością, szczególnie w układach zbudowanych w oparciu o papier celulozowy tego rodzaju metody dają bardzo dobre wyniki. Metody te swoją popularność zawdzięczają możliwości wykonania bezinwazyjnej diagnostyki w miejscu zainstalowania transformatora, czego dowodem są dedykowane zestawy pomiarowe wraz z analitycznym oprogramowaniem.

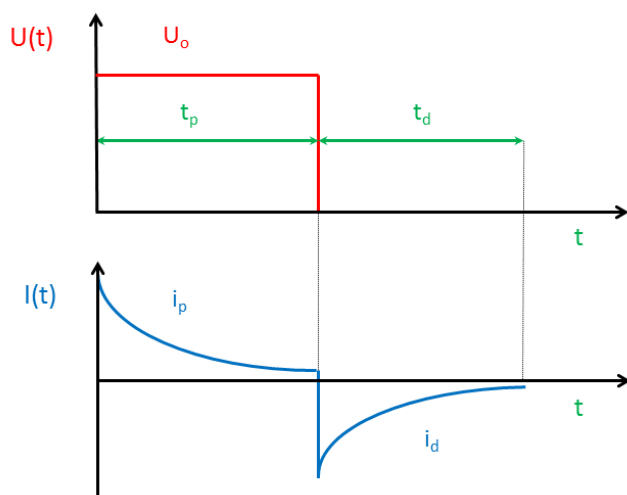
Stosowane metody wykorzystują zaawansowane metody analizy zjawisk polaryzacji elektrycznej dielektryków z głównym naciskiem na tzw. odpowiedź dielektryczną. W tej grupie metod diagnostycznych dużym uznaniem cieszą się: PDC, FDS i RVM [2, 17, 38, 95].

W ramach tych metod przeprowadzane są analizy zarówno w dziedzinie czasu (PDC i RVM) jak i częstotliwości [FDS]. W zależności od rodzaju badanego materiału oraz parametrów układu, stosuje się dość długie czasy pomiarów sięgających nawet 10^4 s. Jest to głównie spowodowane długim czasem relaksacji makrocząsteczek stosowanych materiałów oraz silną polarnością wody ($\epsilon' \approx 81$).

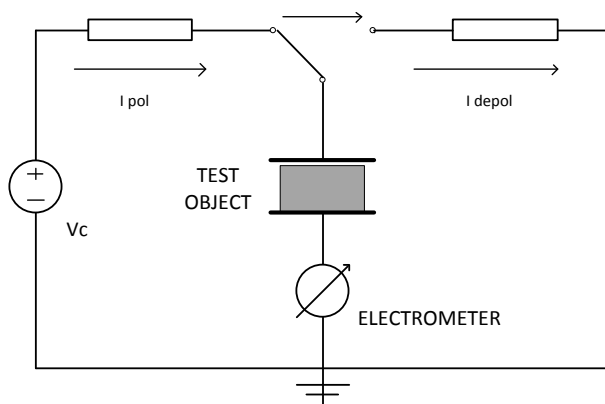
Metody polaryzacyjne dotychczas głównie były wykorzystywane w diagnostyce zawilgocenia izolacji stałej, jednakże w przypadku nowych rodzajów izolacji o znacznie mniejszej hydroskopijności pozwalają także na oszacowanie stopnia zesterzenia badanej izolacji.

6.2.1. Metoda PDC

Metoda analizy prądów polaryzacji i depolaryzacji elektrycznej (PDC - Polarization and Depolarization Current) jest modyfikacją stosowanej wcześniej metody badań współczynnika polaryzacyjnego PI (Polarization Index). Metoda ta polega na podłączeniu transformatora do źródła napięcia stałego i rejestracji prądu polaryzacji przez założony z góry czas (t_p). Następnie źródło zasilania jest odłączone, a zaciski pomiarowe badanego transformatora zwarte (rys. 6.2). W wyniku czego rejestruje się wartość prądu depolaryzacji przez czas (t_d) do momentu jego zaniku czyli do całkowitego rozładowania badanego układu [56]. Rysunek 6.3 przedstawia zasadę działania układu pomiarowego.



Rys. 6.2. Przebieg prądów i napięć występujące podczas cyklu pomiarowego PDC



Rys. 6.3. Zasada działania zastosowanego układu pomiarowego

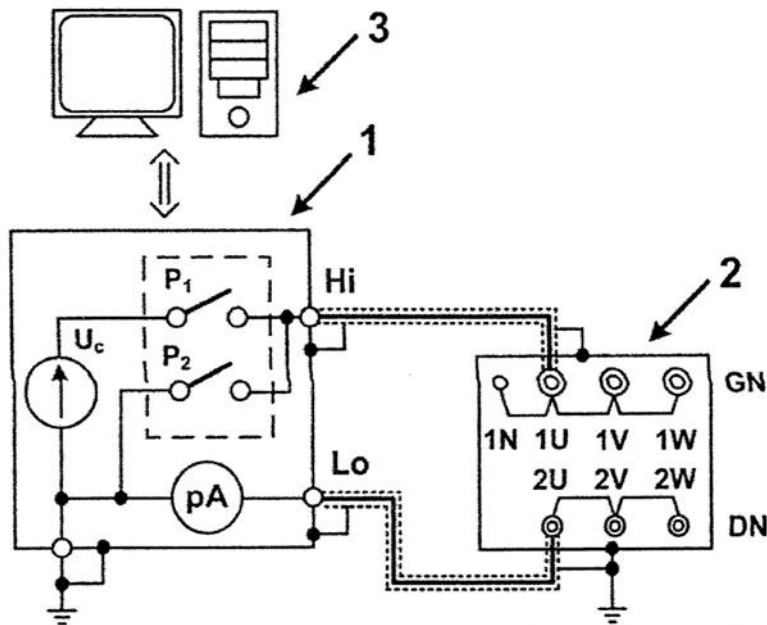


Rys. 6.4. Urządzenie do diagnostyki izolacji transformatora metodą PDC, PDC Analyser-1MOD firmy ALFF Engineering

Dzięki dedykowanym układom pomiarowym oraz oprogramowaniu metoda ta pozwala na wykonywanie pomiarów w miejscu zainstalowania transformatora. Przykładowy osprzęt diagnostyczny do wykonywania pomiarów metodą PDC przedstawia rysunek 6.4. Przenośne zestawy diagnostyczne są zazwyczaj wysoko wyspecjalizowanymi urządzeniami łączącymi wiele funkcji, począwszy od jednostki komputerowej z oprogramowaniem, szeroko zakresowego elektrometru o specjalnych właściwościach filtrujących, regulowanego źródła napięcia, urządzeń przełączających, a skończywszy na oprogramowaniu niezbędnym do przeprowadzenia pomiarów oraz analizy otrzymanych wyników. Rysunek 6.5 przedstawia schemat typowego układu połączeń stosowanego w diagnostyce transformatorów energetycznych metodą PDC.

Wyniki uzyskiwane skutkiem przeprowadzanych badań metodą PDC otrzymywane są w formie rodzin charakterystyk prądowo-czasowych (rys. 6.6). Mimo zaawansowanych badań oraz sprzętu do analizy pomiarów niezbędny jest czynnik ludzki. Tylko osoby z dużym doświadczeniem oraz dysponujące szeroką bazą wykonanych pomiarów we wcześniejszym okresie użytkowania transformatora lub opierające się na transformatorach podobnego typu,

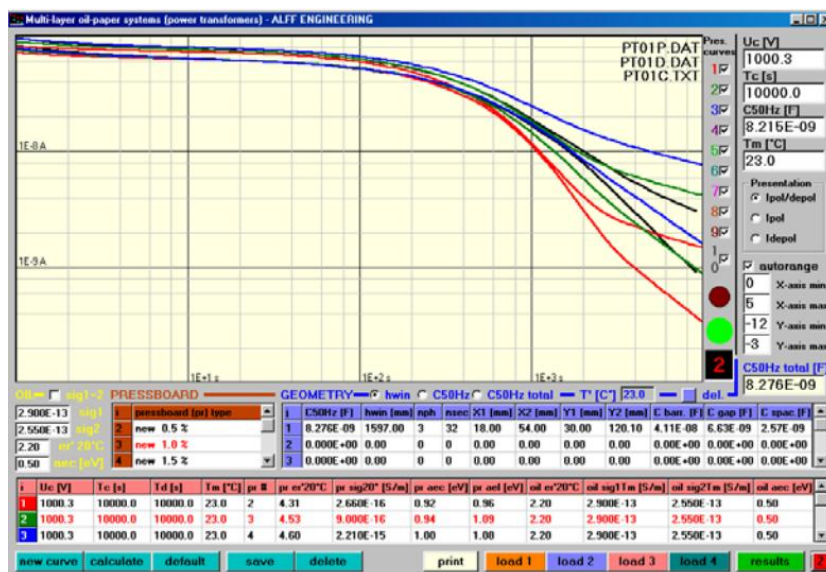
są w stanie ocenić stan zawilgocenia i zesterzenia izolacji papierowej. W celu zwiększenia wiarygodności poszczególnych diagnoz stosuje się zazwyczaj równolegle dwie lub nawet więcej rodzajów metod diagnostycznych [11, 86].



Rys. 6.5. Schemat układu połączeń stosowany w diagnostyce transformatorów energetycznych metodą PDC [107]

- 1- układ pomiarowo-przełączający,
- 2- badany transformator,
- 3- komputer umożliwiający rejestrację otrzymanych wyników

Z punktu widzenia diagnostyki stanu izolacji transformatorów energetycznych, kluczowym jest dobór prawidłowej wartości napięcia ładowania (U_c) oraz czasów rejestracji prądów polaryzacji i depolaryzacji. Dobór zbyt niskiej wartości napięcia ładowania pociąga za sobą problemy natury technicznej związane z niskimi wartościami prądów mierzonych, które w praktyce wahają się w okolicach nA, a dodatkowo układy pomiarowe stają się bardzo wrażliwe na zakłócenia występujące podczas badań. Dobór zbyt dużej wartości napięcia ładowania wywołuje „maskujący” efekt składowej przewodnościowej prądu polaryzacji oraz może skutkować powstawaniem nieliniowych zjawisk relaksacyjnych, znacznie utrudniających poprawną interpretację uzyskanych wyników pomiarowych.



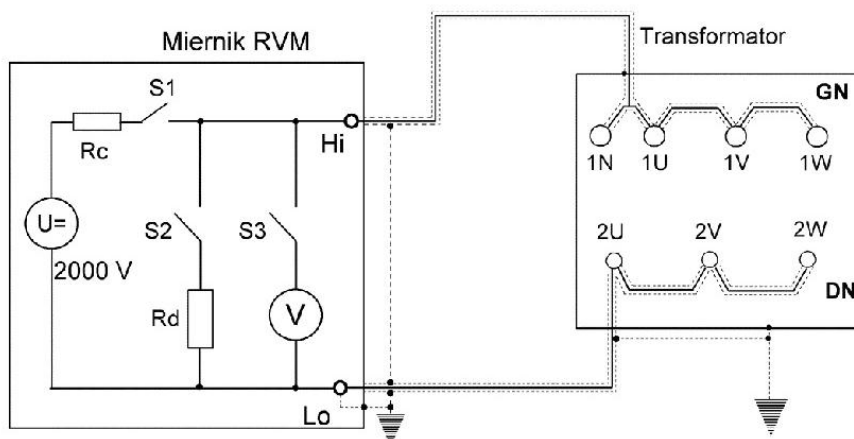
Rys.6.6. Przykładowy zrzut z ekranu obrazujący otrzymane wyniki na podstawie pomiaru metodą PDC, przenośnym urządzeniem pomiarowym [110]

Analiza pomiarów prądów polaryzacji i depolaryzacji dostarcza wielu informacji, jednakże złożoność procesów zachodzących podczas tego rodzaju zjawisk wymaga dogłębnej wiedzy z zakresu dielektryków. Analizując pierwszy okres (do ok. 100s) otrzymanych wyników należy wziąć pod uwagę, że są one determinowane głównie właściwościami oleju izolacyjnego, tzn. przede wszystkim jego przewodnictwem. Znaczny wpływ wywiera także pojemność kanałów izolacyjnych. W celu oszacowania stanu izolacji stałej transformatora najlepiej jest analizować przedziały czasowe nieco wyższe, powyżej (100s), jednakże dokładne zakresy winne być determinowane w zależności od badanego rodzaju izolacji oraz od stosowanego napięcia ładowania [105, 109].

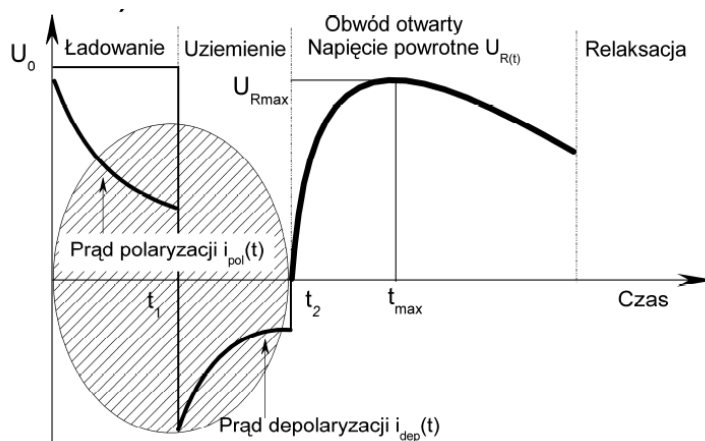
6.2.2. Metoda RVM

Inną szeroko stosowaną metodą służącą do analizy stanu izolacji stałej wykorzystującej analizę zjawiska polaryzacji w dziedzinie czasu jest metoda napięcia powrotnego (RVM – Recovery Voltage Method). Jest ona pochodną metody PDC. Polega na rejestracji i analizie zmian maksimum napięcia powrotnego w funkcji czasu ładowania.

a)



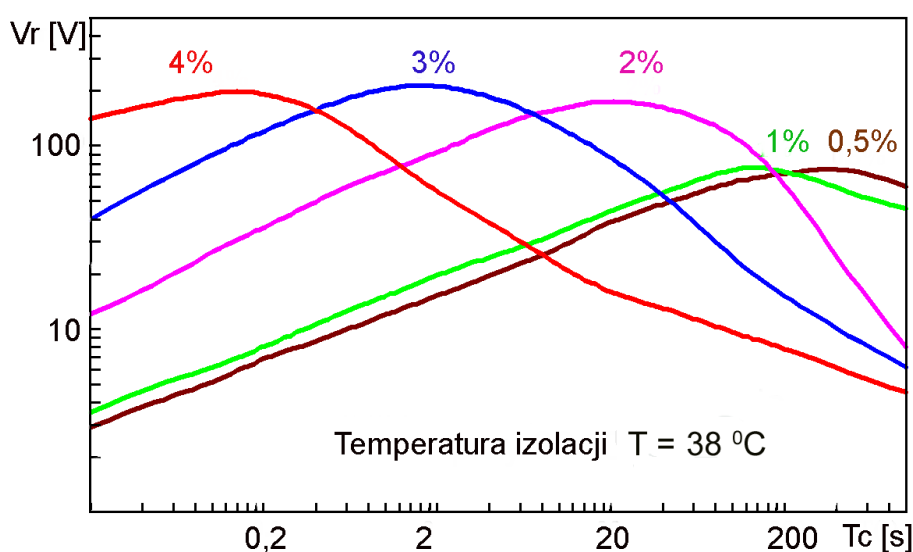
b)



Rys. 6.7. Metoda RVM a) schemat układu połączeń, b) przebiegi czasowe prądów i napięć podczas diagnostyki stanu izolacji metodą RVM [96]

Proces przeprowadzenia metody RVM składa się z czterech etapów. Pierwszy zaczyna się od momentu przyłożenia źródła napięcia do układu i trwa do czasu jego wyłączenia. W tym etapie następuje proces ładowania badanego obiektu (izolacji diagnozowanego transformatora) napięciem stałym. Kolejny (drugi etap) polega na zwarcie izolacji, gdzie czas zwarcia zazwyczaj równy jest połowie czasu ładowania. Jest to zależność wynikająca z zastosowania w algorytmach analitycznych, szeregowo-równoległego schematu zastępczego izolacji papierowo-olejowej zgodnie z modelem Debye'a. Trzeci etap rozpoczyna się z chwilą rozwarcia przełącznika S2 i zwarcia przełącznika S3 (rys. 6.7 a). Zastosowanie krótszego czasu depolaryzacji od czasu polaryzacji skutkuje niepełnym rozładowaniem dielektryka. W wyniku

tego rozpoczyna się powolny proces narastania napięcia, do momentu osiągnięcia wartości maksymalnej, po czym jego powolny zanik. Zarówno proces narastania jak i proces jego zaniku, określają dwie różniące się stałe czasowe. Rejestracja napięcia odbywa się poprzez woltomierz o wysokiej rezystancji wejściowej (rys. 6.7 b). Dedykowane układy pomiarowe (rys. 6.9) rejestrują zazwyczaj: wartość maksymalną napięcia, czas jej osiągnięcia oraz współczynnik kierunkowy prostej, stycznej do czoła napięcia powrotnego, określający szybkość jego narastania. Ostatni etap polega na odłączeniu woltomierza i ponownemu zwarceniu izolacji w celu jej całkowitego rozładowania.



Rys. 6.8. Charakterystyki napięcia powrotnego V_r izolacji papierowo-olejowej o różnym stopniu zawilgocenia [68]

Rysunek 6.8 przedstawia przykładowe wyniki pomiarów napięcia powrotnego dla układów o zróżnicowanym stopniu zawilgocenia. Zmiana stopnia zawilgocenia ma zarówno wpływ na wartość szczytowych wartości napięcia powrotnego jak i czas w którym on występuje. Wzrost zawilgocenia wpływa na wcześniejsze wystąpienie szczytowych wartości napięcia powrotnego. W przypadku występowania pojedynczych wartości szczytowych napięcia powrotnego, diagnostyka jest stosunkowo łatwa. Jednakże w przypadku wystąpienia braku równowagi hydrodynamicznej układu izolacyjnego może wystąpić zjawisko wystąpienia dwóch lub nawet większej ilości „maksimów”, co znacznie utrudnia interpretację uzyskanych wyników.

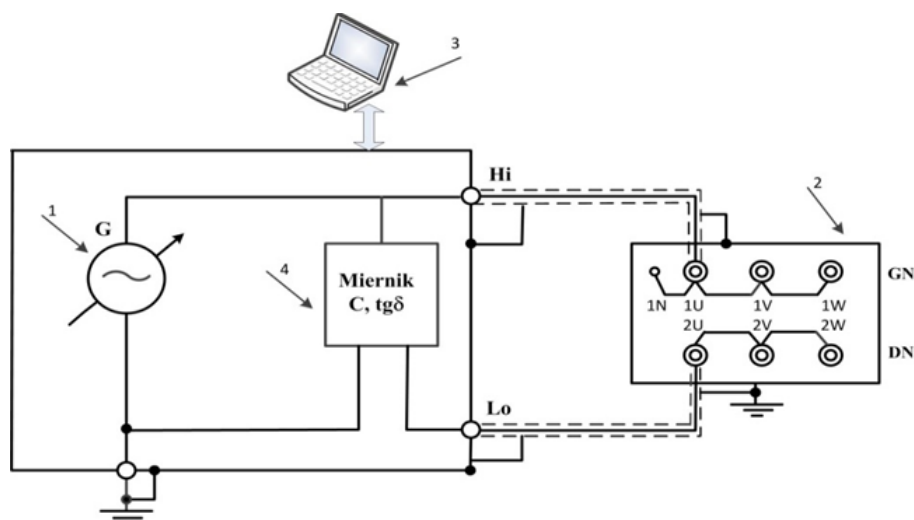


Rys. 6.9. Dedykowane urządzenie stosowane do pomiarów metodą RVM, 5462 - Recovery Voltage Meter firmy Haefely Hipotronics

6.2.3 Metoda spektroskopii częstotliwościowej

Spektroskopia dielektryczna w dziedzinie częstotliwości (FDS- Frequency Dielectric Spectroscopy) jest techniką polegającą na pomiarze pojemności oraz strat dielektrycznych w szerokim zakresie częstotliwości. Ze względu na znaczne wartości czasów relaksacji mechanizmów polaryzacji występujących w izolacji papierowo-olejowej, najbardziej istotne pozostają pomiary przeprowadzone w niskich częstotliwościach od 10^{-4} Hz. Większość pomiarów odbywa się w częstotliwościach poniżej 1 Hz, dlatego niemożliwe jest stosowanie metod mostkowych. Do pomiarów metodą FDS wykorzystywane są regulowane wysokonapięciowe generatory niskich częstotliwości napięcia sinusoidalnego wraz z układami rejestrującymi chwilowe wartości napięć i prądów [25]. Na podstawie uzyskanych przebiegów czasowych wyznaczane są wartości impedancji, rezystancji, $\text{tg}\delta$ oraz pojemności.

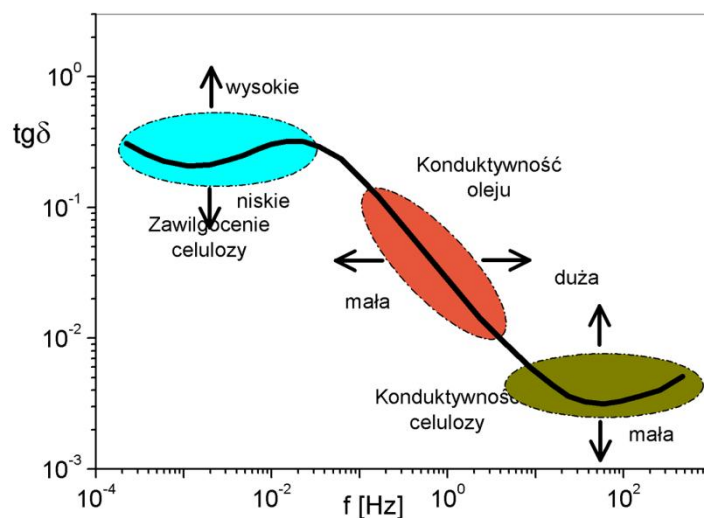
Przykładowy schemat układu połączeń wykorzystywany do pomiaru metodą FDS przedstawia rys. 6.10. Istnieją możliwe modyfikacje powyższego układu np. poprzez dokonywanie pomiarów między uzwojeniem, a kadzią bądź rdzeniem transformatora.



Rys. 6.10. Schemat układu połączeń stosowanych w diagnostyce transformatorów energetycznych metodą FDS [32, 102];

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 $\text{tg}\delta$

Podstawowym celem pomiarów diagnostycznych metodą FDS jest wyznaczenie stopnia zawilgocenia izolacji papierowej transformatora [20, 33]. Wzrost zawartości wody w izolacji skutkuje wzrostem pojemności oraz $\text{tg}\delta$ celulozy. Ze względu na złożoność zjawisk zachodzących równocześnie (procesy przewodnictwa oraz relaksacji), mogą występować różnice w rejestrowanych przebiegach. Dodatkowo wpływ zesterzenia: oleju, celulozy czy temperatury układu utrudnia analizę otrzymanych wyników. Rysunek 6.11 przedstawia wpływ niektórych parametrów izolacji na charakterystykę współczynnika $\text{tg}\delta$.



Rys. 6.11. Wpływ stanu izolacji papierowo-olejowej na charakterystykę współczynnika stratności $\text{tg}\delta$ wyznaczoną metodą FDS [68, 95]

Podobnie jak w przypadku pozostałych metod polaryzacyjnych firmy zajmujące się diagnostyką wykorzystującą metodę FDS stosują dedykowane urządzenia wraz z oprogramowaniem umożliwiającym analizę uzyskanych wyników. Przykładowy zestaw pomiarowy firmy Omicron przedstawia rysunek 6.12.



Rys. 6.12. Miernik Dirana firmy Omicron wykorzystywany do pomiarów metodą FDS [22]

7. Starzenie izolacji stosowanej w transformatorach mocy

7.1. Starzenie mineralnego oleju izolacyjnego

Mineralne oleje izolacyjne to złożone węglowodory, które ulegają procesom starzeniowym, w wyniku oddziaływania całego szeregu czynników, które występują w trakcie eksploatacji olejowych transformatorów energetycznych. Głównym czynnikiem powodującym degradację tego typu olejów jest wysoka temperatura, punktowo i okresowo pojawiająca się w transformatorach oraz obecność innych substancji takich jak tlen i woda. Zachodzące w oleju zmiany fizykochemiczne objawiają się początkowo wydzielaniem kwasów organicznych, w tym głównie kwasu octowego, mrówkowego, masłowego i izowalerianowego [26, 98, 107]. Olej zestarzony charakteryzuje się podwyższoną zawartością substancji takich jak: fenole, alkohole, laktony, ketony, aldehydy oraz proste estry. Na końcowy etap starzenia oleju wskazuje wzrastająca obecność frakcji smoły, asfaltów i mydła, które w postaci szlamu mogą osadzać się w najgorętszych miejscach, często blokując prawidłowy przepływ oleju [108].

Tabela 7.1. Maksymalna rozpuszczalność gazów w oleju mineralnym T=25°C, P=1013 hPa)[92]

Gaz	Objętość [%]
Wodór (H ₂)	7,0
Tlen (O ₂)	16,0
Azot (N ₂)	8,6
Powietrze	9,4
Tlenek węgla (CO)	9,0
Dwutlenek węgla (CO ₂)	120,0
Metan (CH ₄)	30,0
Acetylen (C ₂ H ₂)	400,0
Etylen (C ₂ H ₄)	280,0
Etan (C ₂ H ₆)	280,0
Propylen (C ₂ H ₆)	1200,0
Propan (C ₃ H ₈)	1900,0

Przyjmuje się, że dopuszczalna długotrwałe temperatura pracy oleju przy dostępie powietrza nie powinna przekroczyć 95°C. Potencjalny wzrost temperatury o 10°C pociąga za sobą nawet trzykrotnie szybsze tempo degradacji oleju [72, 94].

Znaczący wpływ na proces starzenia mineralnych olejów izolacyjnych ma obecność pola elektrycznego. Dla natężenia pola elektrycznego rzędu 103 kV/m można zauważyć zmiany jakościowe w oleju objawiające się wydzielaniem wody oraz innych osadów. Wzrost natężenia pola do wartości 104 kV/m powoduje wydzielanie się metanu, wodoru oraz cząstek o wysokim stopniu polimeryzacji. Dodatkowo reakcje starzeniowe intensyfikują wyładowania typu niezupełnego. W pierwszej fazie powstałe gazy rozpuszczają się w oleju (tab. 7.1.) jednak po przekroczeniu stanu nasycenia powstają pęcherzyki, mogące intensyfikować powstawanie wyładowań niezupełnych.

Tabela 7.2. Wymagania stawiane eksploatowanym mineralnym olejom izolacyjnym przeznaczonym do napełniania transformatorów energetycznych (norma IEC 60422)

Własność	Poziom górnego napięcia [kV]		
	<72,5	72,5-170	>170
Wygląd	wolny od zanieczyszczeń		
Napięcie przebicia [kV]	>30	>40	>50
Zawilgocenie w 20°C [ppm]	<25	<15	<10
Liczba kwasowa [mgKOH/g]	>0,3	>0,2	>0,15
Współczynnik stratności tgδ w 90 °C, 50 Hz	<0,5	<0,5	<0,2
Rezystywność w 90 °C [Ωm]	>0,2•10 ⁹	>1•10 ⁹	>1•10 ⁹
Stabilność oksydacyjna	zgodnie z normą IEC 60296		
Napięcie powierzchniowe [mN/m]	>24		
Zawartość PCB [ppm]	przepisy lokalne		
Temperatura zapłonu	maksymalnie o 10 °C niższa od wartości początkowej		
Zawartość inhibitora	>40% wartości pierwotnej		

Postępujący proces starzenia oleju mineralnego pociąga za sobą pogarszanie się jego właściwości elektroizolacyjnych. Szczególnie niebezpieczna jest zbierająca się woda w postaci emulsji, bezpośrednio wpływająca na obniżenie wytrzymałości elektrycznej, obniżenie właściwości rezystancyjnych oleju oraz wzrost współczynnika stratności tgδ. Starzenie oleju mineralnego wiąże się także z obniżeniem temperatury zapłonu oraz z wzrostem liczby kwasowej. Wymagania stawiane mineralnym olejom będących w eksploatacji wg normy IEC 60422 przedstawia tabela 7.2.

7.2. Starzenie izolacji stałej

Starzenie izolacji stałej transformatorów jest skomplikowanym procesem chemicznym. Podstawową przyczyną destrukcji tego rodzaju izolacji jest w głównej mierze temperatura, dlatego materiały izolacyjne oparte o produkty celulozowe coraz częściej wypierane są przez nowe udoskonalone materiały o znacznie wyższej odporności na wysoką temperaturę.

Podstawowe parametry papieru aramidowego opisane zostały w podrozdziale 3.2. W celu wykonania przyspieszonego, kontrolowanego procesu starzenia izolacji aramidowej wykorzystano sprawdzoną i szeroko opisaną metodę, stosowaną już w przypadku izolacji celulozowej. Polegała ona na umieszczeniu izolacji celulozowej przed impregnacją w komorze o stałej podwyższonej temperaturze w obecności powietrza. W ramach starzenia wspomnianej wcześniej izolacji celulozowej typu Tertrans N 125 wystarczyło wygrzewać świeży papier w temperaturze 150 °C przez 25 h, aby uzyskać utratę stopnia polimeryzacji papieru o ok. 50% w stosunku do wartości początkowej, zaś przeprowadzając ten sam proces w temperaturze 170 °C przez 25 h spowodować utratę stopnia polimeryzacji rzędu 70%, zgodnie z danymi zaczerpniętymi z literatury [53].

Jednakże w przypadku izolacji złożonej z papieru aramidowego nie ma możliwości bezpośredniego przeniesienia wartości temperatur i czasów związanych z metodą przyspieszonego starzenia stosowaną w przypadku papieru celulozowego. Ostatecznie postanowiono wytypować do badań izolację wykonaną z papieru aramidowego o typoszeregu najszerszej stosowanym w izolacji uzwojeń transformatorów energetycznych, tzn. papier Nomex® serii 410 o grubości 0,05 mm produkowany przez firmę DuPont. Bardzo dobre właściwości tego materiału pod względem wytrzymałości na temperaturę, wytrzymałości mechanicznej, elektrycznej itp. (szczegółowo opisane w rozdziale 3), powodują coraz szersze zastosowanie tego materiału w miejsce izolacji celulozowej.

Ze względu na brak jednoznacznych informacji znajdujących się w dostępnej literaturze, wykonano szereg doświadczeń pozwalających opracować skuteczną i powtarzalną metodę starzenia izolacji aramidowej w postaci papieru Nomex® serii 410. Biorąc pod uwagę właściwości techniczne papieru aramidowego typu 410 (o grubości 50 μm), dane uzyskane z opracowań naukowych oraz własne badania wstępne, proces przyspieszonego starzenia próbek izolacji aramidowej podzielono na pięć części. Świeża, nie impregnowana izolacja aramidowa została poddana przyspieszonemu starzeniu w komorze w temperaturze 250 °C przez 50 h z dostępem powietrza. Proces ten był kolejno powtarzany dla odpowiednio zdefiniowanych przedziałów czasu, w wyniku czego uzyskano sześć rodzajów próbek o różnym poziomie zesterzenia, od niezestaryzonych do zestaryzonych w temperaturze 250 °C przez 250 h. Czasy wygrzewania i stopnie zesterzenia izolacji przedstawia tabela 7.3.

Tabela 7.3. Zestawienie czasów wygrzewania izolacji z przypisanym stopniem jej degradacji

Czas wygrzewania [h]	Stopień zesterzenia	Temperatura wygrzewania
0	I	250°C
50	II	
100	III	
150	IV	
200	V	
250	VI	

Serie próbek przygotowanych w powyższy sposób zostały poddane szeregowi testów pozwalających określić zmiany w podstawowych parametrach izolacji jakie zaszły pod wpływem przyspieszonego starzenia termicznego.

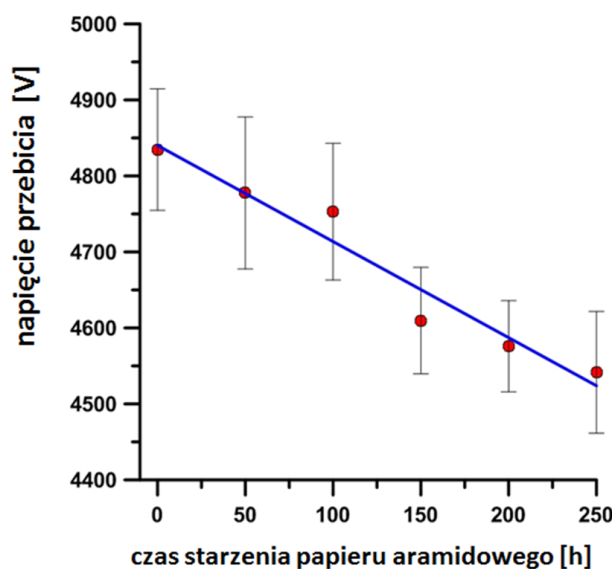
7.3. Zmiany parametrów elektrycznych izolacji aramidowej pod wpływem przyspieszonego starzenia

W ramach przeprowadzonych badań zmian właściwości elektrycznych zestaryzonych próbek wykonano trzy serie pomiarów: napięcia przebicia, rezystywności skrośnej oraz

rezystywności powierzchniowej. Badania napięcia przebicia zostały wykonane poprzez umieszczenie czterech warstw izolacji aramidowej między elektrodami kołowymi o zaokrąglonych krawędziach w układzie współosiowym. Dokładny kształt elektrod oraz procedurę pomiaru opisuje norma PN-IEC 243-1. Układ elektrod zasilony był z wysokonapięciowego układu probierczego zgodnie z wymaganiami norm PN-EN 60060-1



Rys. 7.1. Układ pomiarowy do sprawdzania napięcia przebicia próbek



Rys. 7.2. Zależność napięcia przebicia od stopnia zesterzenia izolacji wykonanej z papieru aramidowego

oraz PN-EN60060-2 (rys.7.1). Głównym elementu układu zasilającego był transformator wysokiego napięcia TP-60. W celu uniknięcia przeskoków powierzchniowych podczas prób wymiary próbek wynosiły 100x100 mm [83]. Każdorazowe przebicie napięciem

przebiegiem warstw izolacji było odnotowywane i wykonane trzykrotnie dla każdego rodzaju zestarzonych grup próbek. Rysunek 7.2 przedstawia negatywny wpływ procesu starzenia na wartość napięcia przebicia zestarzonych próbek izolacji. Zaobserwowany spadek wartości napięcia przebicia próbek papieru aramidowego w funkcji czasu przyspieszonego starzenia dowodzi, że opisana procedura starzenia istotnie zmienia strukturę materiału.

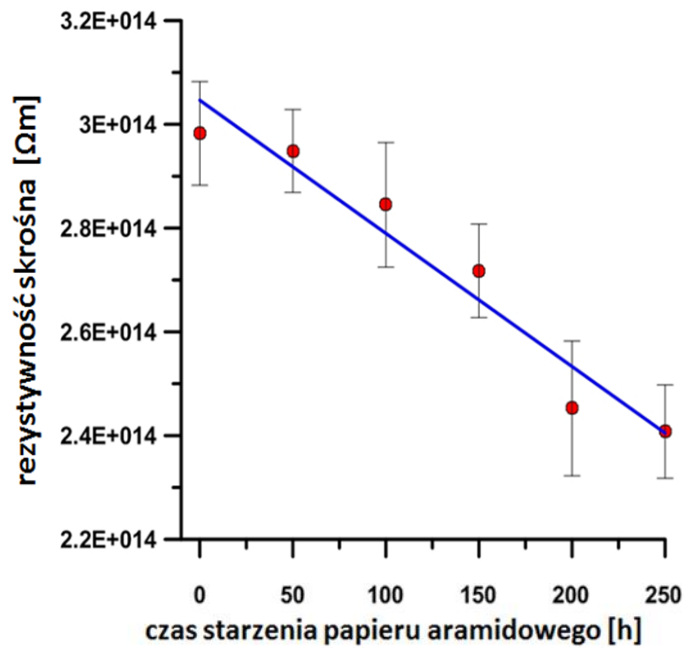


Rys. 7.3. Zestaw do pomiaru rezystywności skrośnej i powierzchniowej firmy Keithley, (od lewej: komora do pomiaru rezystywności Keithley 8009, elektrometr Keithley 6517A)

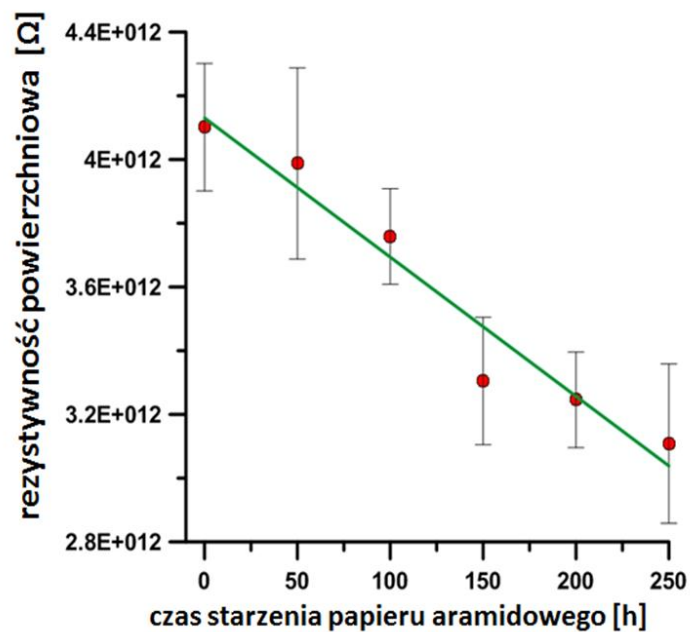
W celu dokonania pomiaru rezystywności skrośnej i powierzchniowej wykorzystano zestaw firmy Keithley (komora do pomiaru rezystywności Keithley 8009 oraz elektrometr Keithley 6517A, rys. 7.3). Wyniki pomiarów prezentuje rysunek 7.4. Zaobserwowane zmiany wartości rezystywności związane z procesem starzenia dowodzą, że próbki najbardziej zestarzone charakteryzowały się nawet 20% spadkiem wartości rezystywności skrośnej jak i powierzchniowej w stosunku do próbek niestarzonych.

Podsumowując, stwierdzić można, że procedura przyspieszonego starzenia papieru aramidowego znacząco zmienia własności elektryczne materiału na niekorzyść, co objawia się istotnym wzrostem prądu upływu oraz obniżeniem wytrzymałości napięciowej.

a)



b)



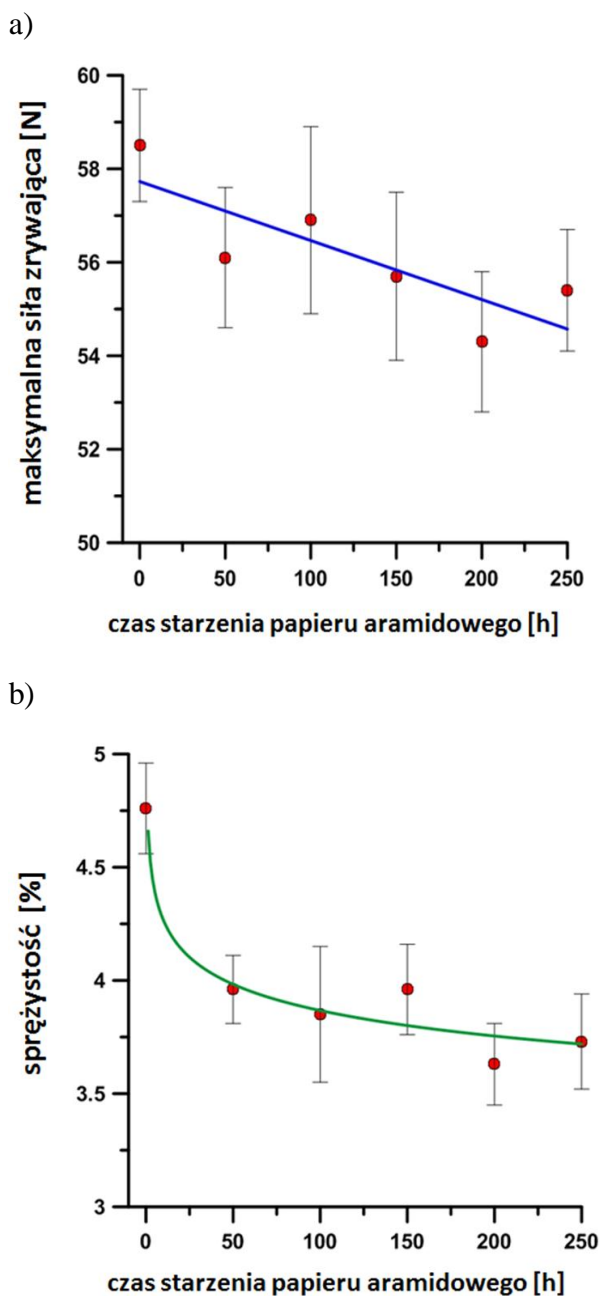
Rys. 7.4. Zależność rezystywności skrośnej (a) oraz rezystywności powierzchniowej (b) od czasu starzenia papieru aramidowego

7.4. Zmiany parametrów mechanicznych izolacji aramidowej pod wpływem przyspieszonego starzenia

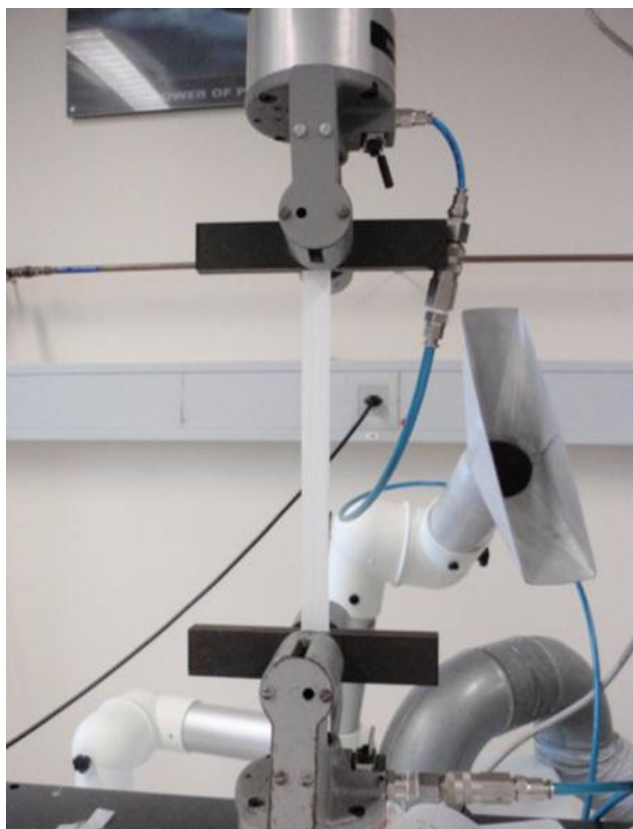
Ze względu na okresowo podwyższone lub obniżone zapotrzebowanie na energię elektryczną w systemie, temperatura występująca w transformatorach rozdzielczych zmienia się, co wpływa na zmiany równowagi hydrodynamicznej między papierem, a olejem. Powoduje to nierównomierny rozkład zawilgocenia w całej objętości izolacji transformatora, praktycznie adekwatną do również nierównomiernego rozkładu temperatury wewnątrz jego uzwojeń. Przyjąć można, że najwyższa temperatura w transformatorze występuje w górnej części uzwojeń blisko rdzenia, natomiast najniższa w dolnej części uzwojeń blisko kadzi. Skutkiem opisanego rozkładu wilgoci i temperatury jest podobny rozkład w ujęciu makroskopowym - stopnia zesterzenia izolacji stałej, a co za tym idzie obniżenia jej wytrzymałości mechanicznej. Siły elektrodynamiczne uzwojeń, szczególnie istotne podczas przenoszonych prądów zwarciovych oraz drgania magnetostrykcyjne rdzenia mogą wykruszać izolację, którą dodatkowo wypłukiwać będzie krążący w transformatorze olej. Obniżona wytrzymałość elektryczna izolacji sprzyja natomiast rozwojowi wyładowań niezupełnych, szczególnie inicjowanych występującymi w systemie przepięciami. Ostatecznie zesterzona izolacja ulega przedwczesnemu uszkodzeniu, będąc często bezpośrednim powodem awarii transformatora [3, 103]. Dlatego parametry wytrzymałości mechanicznej izolacji często odgrywają kluczową rolę w doborze rodzaju izolacji. Izolacja winna zachowywać swoje właściwości mechaniczne mimo wieloletniej eksploatacji transformatorów energetycznych.

Kontrola parametrów mechanicznych zesterzonej izolacji aramidowej odbywa się poprzez badanie próbek zgodnie z wytycznymi standardu ISO 1924-2. Badany materiał został przygotowany w postaci pasków o długości 300 mm i szerokości 15 mm (w każdym typie zesterzenia po 10 próbek). Tak przygotowane (odpowiednio zesterzone zgodnie z tabelą 7.1) próbki zostały poddane badaniom w European Technical Centre w Genewie pod względem zmian w zakresie maksymalnej siły zrywającej oraz sprężystości. Do testów wykorzystano urządzenie Zwick przedstawione na rysunku 7.6. Wpływ stopnia zesterzenia widoczny jest na rysunku 7.5. Korzystną cechą badanego papieru aramidowego jest fakt, że mimo 250 godzin wygrzewania próbek w temperaturze 250°C maksymalna siła zrywająca obniżyła się jedynie nieznacznie. Dowodzi to bardzo dobrej wytrzymałości mechanicznej aramidu mimo długotrwałego procesu starzenia termicznego. Niepokoi jednakże znaczny spadek sprężystości próbek wraz z czasem starzenia. Przyczyny upatrywać należy w procesie

pęknięcia powierzchni włókien aramidowych w podwyższonej temperaturze oraz ich zlepiania się ze sobą. Tym samym materiał może ulegać znacznej deformacji, szczególnie papier aramidowy o małej grubości. Ostatecznie stwierdzić można, że zaproponowana procedura przyspieszonego starzenia próbek papieru aramidowego istotnie zmienia jego właściwości mechaniczne.



Rys. 7.5. Zależność maksymalnej siły zrywającej (a) oraz sprężystości (b) od czasu starzenia papieru aramidowego



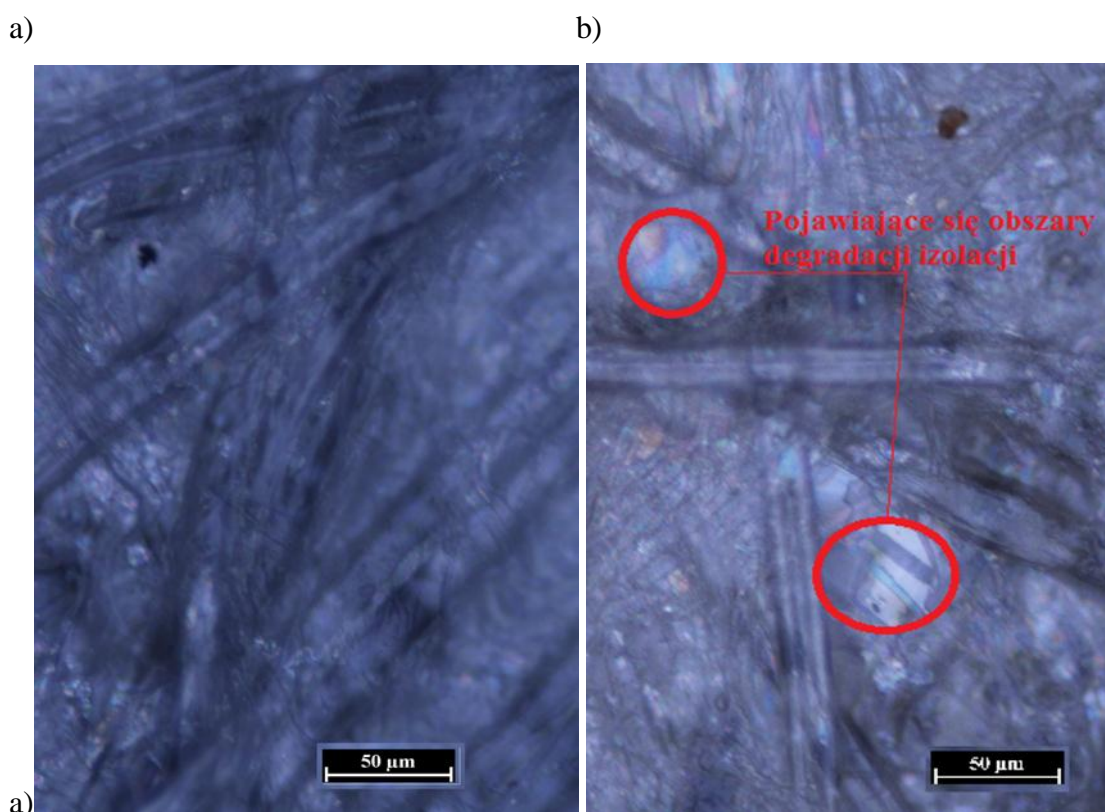
Rys. 7.6. Urządzenie Zwick użyte do badań mechanicznych izolacji aramidowej: siły zrywania oraz sprężystości

7.5. Skutki procesu przyspieszonego starzenia na strukturę materiału

W celu sprawdzenia wpływu procesu przyspieszonego starzenia na strukturę izolacji aramidowej Nomex®, próbki izolacji świeżej (niezestarzonej) oraz próbki izolacji zestarzonej w najwyższym stopniu (250°C przez 250h) zgodnie z tabelą 7.1 zostały sprawdzone pod mikroskopem. Wykonane zdjęcia próbek wskazują na widoczny proces degradacji izolacji aramidowej w przypadku próbki poddanej procesowi starzenia. Proces starzenia izolacji wskazał na powstanie ogniskowych punktów w których struktura izolacji jest uszkodzona na poziomie włókien ją tworzących co zostało przedstawione na rys. 7.7.

Ponieważ dostępna aparatura (maksymalne powiększenie mikroskopu) uniemożliwiła uzyskanie zdjęcia powiększenia pojedynczego włókna aramid, dla próbki starzonej

zaobserwowano jedynie miejsca zlepiania się uszkodzonych włókien. Uzyskano tym samym dowód, że zaproponowana procedura przyspieszonego starzenia papieru aramidowego istotnie zmienia strukturę budowy wewnętrznej materiału.



Rys. 7.7. Wpływ zesterzenia na strukturę papieru aramidowego a) papier niezesterzony, b) papier zesterzony

7.6. Podsumowanie wpływu procesu starzeniowego na izolację aramidową.

Dla parametrów elektrycznych największe zmiany wystąpiły w przypadku badania zmian rezystywności powierzchniowej, gdzie jej wartość spadła o ponad 25% porównując próbkę świeżą z próbką o najwyższym stopniu zesterzenia. Zaś najmniejsze zmiany wystąpiły podczas badania wartości napięcia przebicia, spadek wartości w tej dziedzinie wynosił nieznacznie ponad 6%.

W przypadku badań parametrów mechanicznych degradacja wartości sprężystości oraz siły zrywania, wykazała znaczną tendencję do pogorszenia się parametrów sprężystości izolacji (ok. 20% wartości), zaś znacznie mniejsza zależność pomiędzy starzeniem izolacji, a

siłą zrywania. Zjawisko to jest związane włóknistą budową materiału, w której podczas wstępnych procesów starzenia materiał ulega znacznemu usztywnieniu, przy nieznacznych zmianach wytrzymałości siły zrywania.

Wykonane badania optyczne nie umożliwiły oszacowania stopnia degradacji materiału ale potwierdziły wcześniejsze testy oraz uwidoczniły powstałe zmiany w strukturze materiału na skutek kontrolowanych procesów przyspieszonego starzenia.

Przeprowadzone badania wskazują, że proces przyspieszonego kontrolowanego starzenia ma odzwierciedlenie we wszystkich badanych parametrach, zarówno elektrycznych jak i mechanicznych. Nie wszystkie parametry uległy pogorszeniu w jednakowym stopniu jednakże kierunek degradacji oraz ich zakres wskazują, że zastosowana metoda przyspieszonego procesu zestarzenia izolacji aramidowej może być stosowana do symulacji postępującej degradacji termicznej izolacji stałej transformatorów energetycznych.

8. Badania laboratoryjne próbek izolacji aramidowo-olejowej metodą PDC

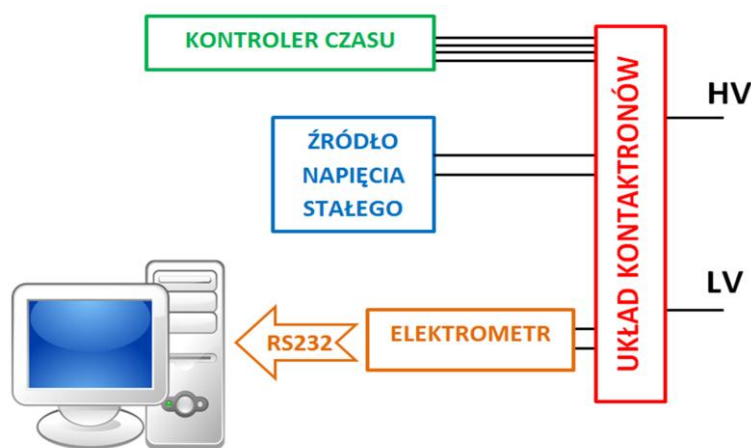
Założeniem badań eksperymentalnym było określenie wpływu czynników typu: temperatura, stopień zawilgocenia i stopień zesterzenia izolacji aramidowo-olejowej na charakterystyki czasowe prądu uzyskiwane w wyniku zastosowania metody PDC. Do przeprowadzenia badań zostały wykorzystane odpowiednio spreparowane próbki izolacji w warunkach kontrolowanych laboratoryjnie, tak aby możliwym było:

- badanie próbek o zróżnicowanym stopniu zesterzenia (niezależnym od stopnia zawilgocenia),
- badanie próbek o zróżnicowanym stopniu zawilgocenia (niezależnie od stopnia zesterzenia),
- dobieranie i utrzymywanie żądanej temperatury próbek izolacji.

Ze względu na wymaganą wysoką powtarzalność i odtwarzalność wykonywanych pomiarów próbki odznaczały się regularnymi kształtami, stosunkowo łatwymi do odtworzenia.

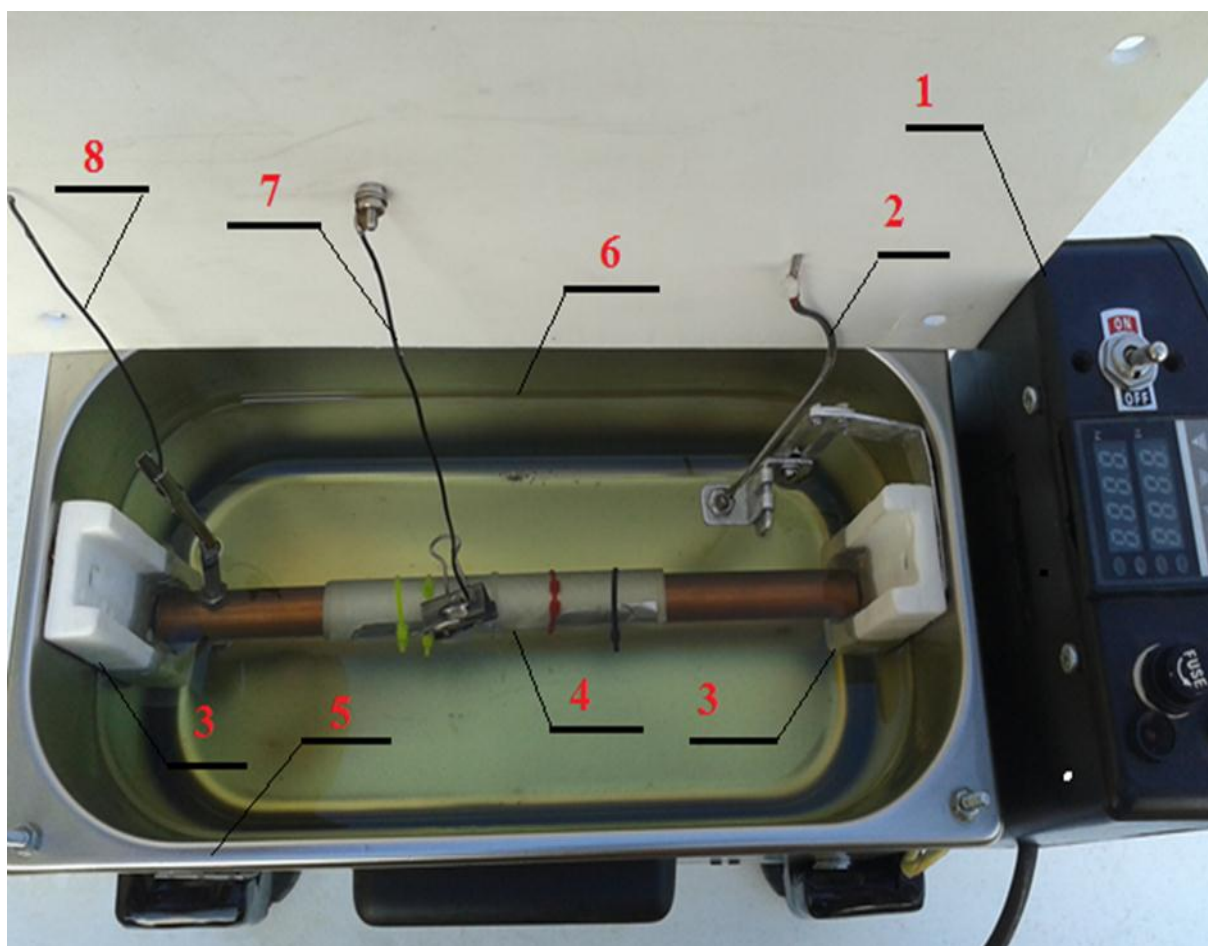
8.1. Układ pomiarowy

Do wykonania serii badań zaprojektowany i wykonany został stacjonarny, laboratoryjny układ pomiarowy do diagnostyki próbek izolacji aramidowo-olejowej metodą PDC, przedstawiony na rysunku 8.1.



Rys. 8.1. Schemat blokowy układu pomiarowego

Najważniejszym elementem układu pomiarowego był układ hermetycznego naczynia pomiarowego wykonanego ze stali nierdzewnej oraz pokrywy teflonowej, gwarantującej szczelność oraz wysoki poziom rezystancji wejściowej badanego układu. Naczynie pomiarowe wraz z zainstalowaną próbką izolacji aramidowo-olejowej przedstawiono na rysunku 8.2. Naczynie umożliwiało zanurzenie w oleju przygotowanej i nawiniętej na jedną z elektrod próbki poprzez osadzenie jej na przygotowanych uchwytach. W celu uzyskania pożądanej stałej kontrolowanej temperatury układu pod naczyniem zamontowana została grzałka, która wraz z czujnikiem temperatury PT100 oraz dedykowanym sterownikiem PID REX – C100, umożliwiała wykonanie serii pomiarów w założonej temperaturze w zakresie od 20°C do 70°C, z dokładnością $\pm 0,5^\circ\text{C}$.



Rysunek 8.2. Naczynie pomiarowe zalane olejem izolacyjnym (mineralnym Nytro 10GBN lub estrem Midel 7131) oraz próbka izolacji aramidowo-olejowej:

1 – układ sterujący temperaturą procesu, 2 czujnik temperatury PT100 – , 3 – izolatory teflonowe utrzymujące pożądane zanurzenie próbki, 4 – badana próbka izolacji aramidowej, 5 – nierdzewne naczynie pomiarowe, 6 – poziom oleju, 7 – elektroda niskiego potencjału, 8 – elektroda wysokiego potencjału.

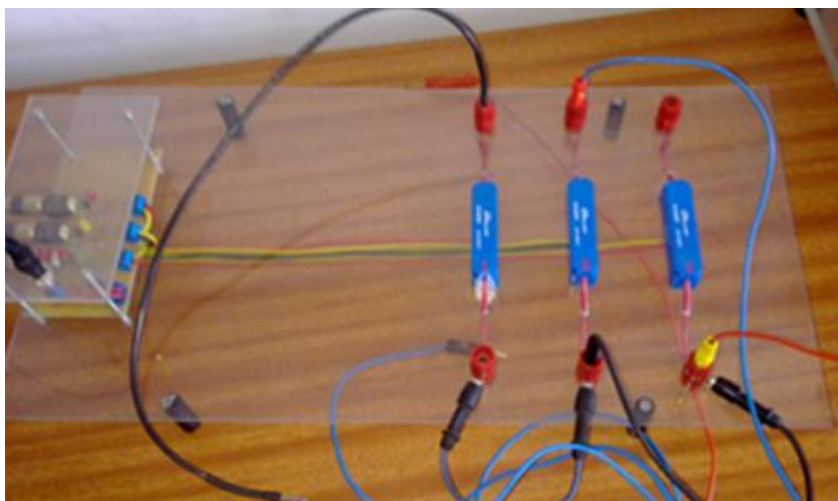
Jako źródło napięcia wykorzystany został miernik wysokich rezystancji BM25 firmy Megger (rys. 8.3). Ze względu na rodzaj jego zasilania (akumulatorowe), które umożliwiło galwaniczną separację układu od zakłóceń sieci energetycznej. Miernik ten umożliwiał precyzyjną cyfrową regulację poziomu napięcia wyjściowego od 50 V do 5 kV z krokiem 25V oraz zapewniał ochronę przed skutkami przypadkowych zwarć w układzie w postaci zabezpieczenia nadprądowego.



Rys. 8.3. Miernik Megger BM25 stosowany w układzie jako stabilne i bezpieczne źródło stałego napięcia

W celu wykonywania niezbędnych przełączeń podczas przeprowadzania badań zastosowany został układ trzech wysokonapięciowych przekaźników kontaktronowych K-552H firmy Dolam z Wrocławia (rys. 8.4), których parametry zostały przedstawione w tabeli 8.1. W celu ograniczenia prądów upływnościowych, układ przekaźników kontaktronowych został zamontowany na przezroczystej płycie pleksi osadzonej na podstawkach izolacyjnych. Do realizacji przełączeń zastosowany został mikroprocesorowy sterownik czasowy (rys. 8.5). Sygnał sterujący kontaktronami odbywał się za pośrednictwem połączeń światłowodowych,

izolujących galwanicznie obydwie układy oraz podnoszący odporność układu na przepięcia generowane podczas przełączeń. Zastosowany sterownik czasowy umożliwił dokonywanie nastaw czasu polaryzacji i depolaryzacji w zakresie od 0,5 s do 1000 s z rozdzielczością 0,5 s, przy dokładności $\pm 0,1\%$.



Rys. 8.4. Układ przełączający złożony z przekaźników K-552H firmy Dolam

Tabela 8.1. Podstawowe parametry techniczne wysokonapięciowych przekaźników kontaktronowych zastosowanych jako elementy przełączające

Parametry		Jednostka	Wartość
Moc przełączeniowa	max	W, VA	50
Wytrzymałość napięciowa	min	kV _{DC}	10
Napięcie przełączeniowe (DC lub AC PEAK)	max	kV	7,5
Prąd przełączeniowy	max	A	2
Rezystancja zestyku	max	mΩ	150
Czas przyciągania	max	ms	3,6
Czas zwalniania	max	ms	0,5

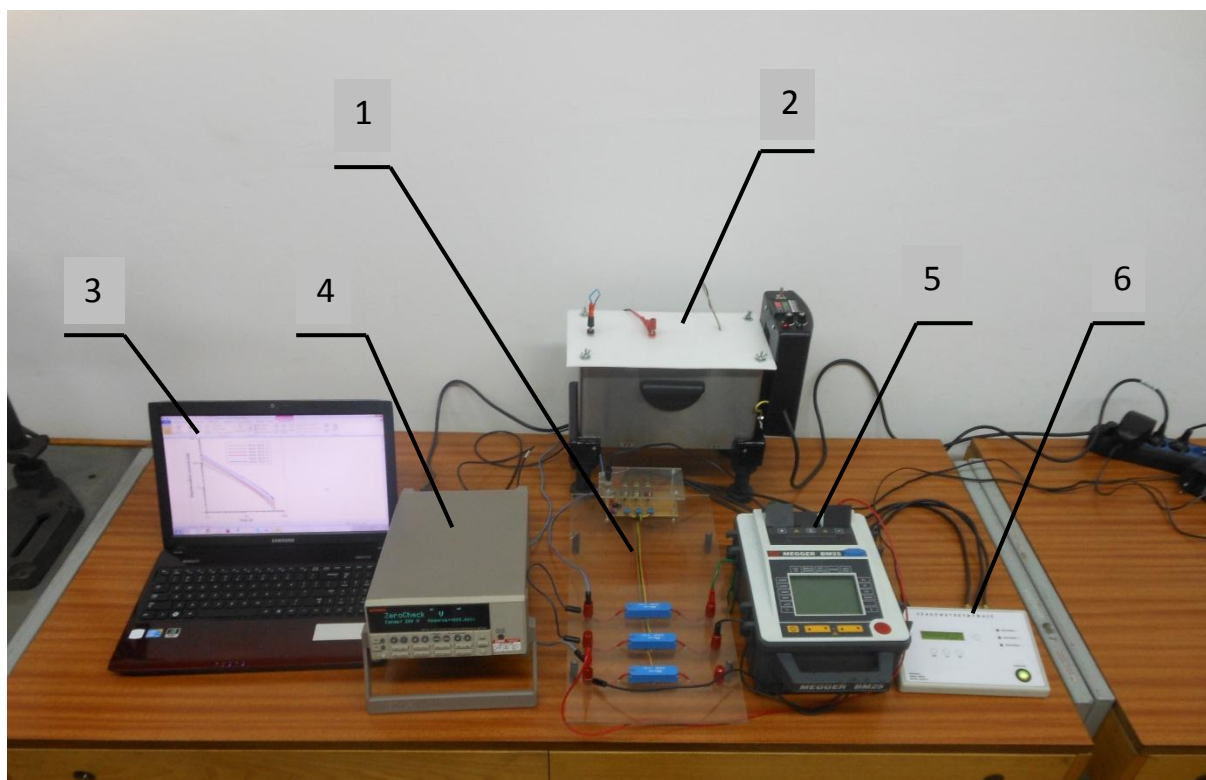
Tor pomiarowy prądu polaryzacji i depolaryzacji składał się z elektrometru Keithley 6517A (rys. 8.6) podłączonego do komputera typu PC. Pomiary prądu wykonywane zostały z częstotliwością 5 Hz, zaś zakres mieścił się od 1pA do 100 nA z rozdzielczością 0,1 pA. Rejestracja wyników odbywała się poprzez komunikację szeregową w standardzie RS232, między elektrometrem a komputerem oraz dedykowane oprogramowanie. Wybrane parametry elektrometru przedstawia tabela 8.2.



Rys. 8.5. Mikroprocesorowy sterownik czasowy , zastosowany w celu przełączania sekwencyjnego przekaźników kontaktronowych

Tabela 8.2. Wybrane parametry techniczne elektrometru Keithley 6517A

Parametr	Wartość
Zakres pomiarowy prądu	1fA - 20mA
Pomiar rezystancji	do $10^{16}\Omega$
Impedancja wejściowa	$200T\Omega$
Prąd polaryzacji	<3fA



Rys. 8.6. Laboratoryjny układ do badania stanu izolacji aramidowo-olejowej metodą PDC:

1 – układ przełączający, 2 - naczynie pomiarowe z badaną próbką, 3 – komputer do zapisu pomiarów, 4- elektrometr Keithley 6517A, 5 – miernik Megger BM25 (stabilne i bezpieczne źródło stałego napięcia), 6- mikroprocesorowy sterownik czasowy

8.2. Sposób przygotowania próbek

Poddane badaniom próbki izolacji wykonane zostały z papieru aramidowego Nomex® typu 410 o grubości 50 μm , którego wybrane parametry elektryczne i mechaniczne przedstawiono w tabeli 8.3. Do nasycenia próbek wykorzystano w wariancie pierwszym: świeży mineralny olej izolacyjny firmy Nynas typu Nytro 10GBN (wybrane parametry techniczne przedstawia tabela 8.4) oraz w wariancie drugim ekologiczny ester syntetyczny Midel 7131 (parametry przedstawiono w tabeli 8.5). Zróżnicowanie stopnia zawilgocenia próbek papieru aramidowego uzyskane zostało poprzez poddanie go przed procesem impregnacji wstępnemu suszeniu w temperaturze 100°C pod próżnią przez okres 24h, ustalając w ten sposób tzw. szcążkowe zawilgocenie początkowe. Zabieg ten umożliwił także określenie wagi początkowej papieru. Wagę początkową oraz kontrolę przyrostu wagi badanej izolacji wykonano z zastosowaniem laboratoryjnej wagi firmy Fawag typu ONYX OX-200 o dokładności pomiarowej $\pm 0,0001$ g (rys. 8.6). Pomiary przyrostu wagi odbywały

się w pomieszczeniu o stałej temperaturze i stałej wilgotności kontrolowanej poprzez stację meteo. Przyrost wagi badanej próbki odbywał się wskutek migracji wilgoci z powietrza do próbki izolacji. Opisana procedura umożliwiła wyznaczenie próbek o zróżnicowanym stopniu zawilgocenia w zakresie od 0% do 3% [102]. Następnie próbki o czterech

Tabela 8.3. Parametry techniczne papieru aramidowego Nomex® serii 410 o grubość 0,05 mm

Parametr	Wartość
Wytrzymałość dielektryczna (kV/mm)	18
Impuls pełnofalowy (kV/mm)	39
Stała dielektryczna przy 60 Hz	1,6
Współczynnik strat przy 60 Hz (x 0,001)	4
Waga (g/m ²)	41
Gęstość (g/cm ³)	72
Wytrzymałość na rozciąganie (N/cm)*	43
Wydłużenie (%)*	9
Siła zerwania (N)*	11

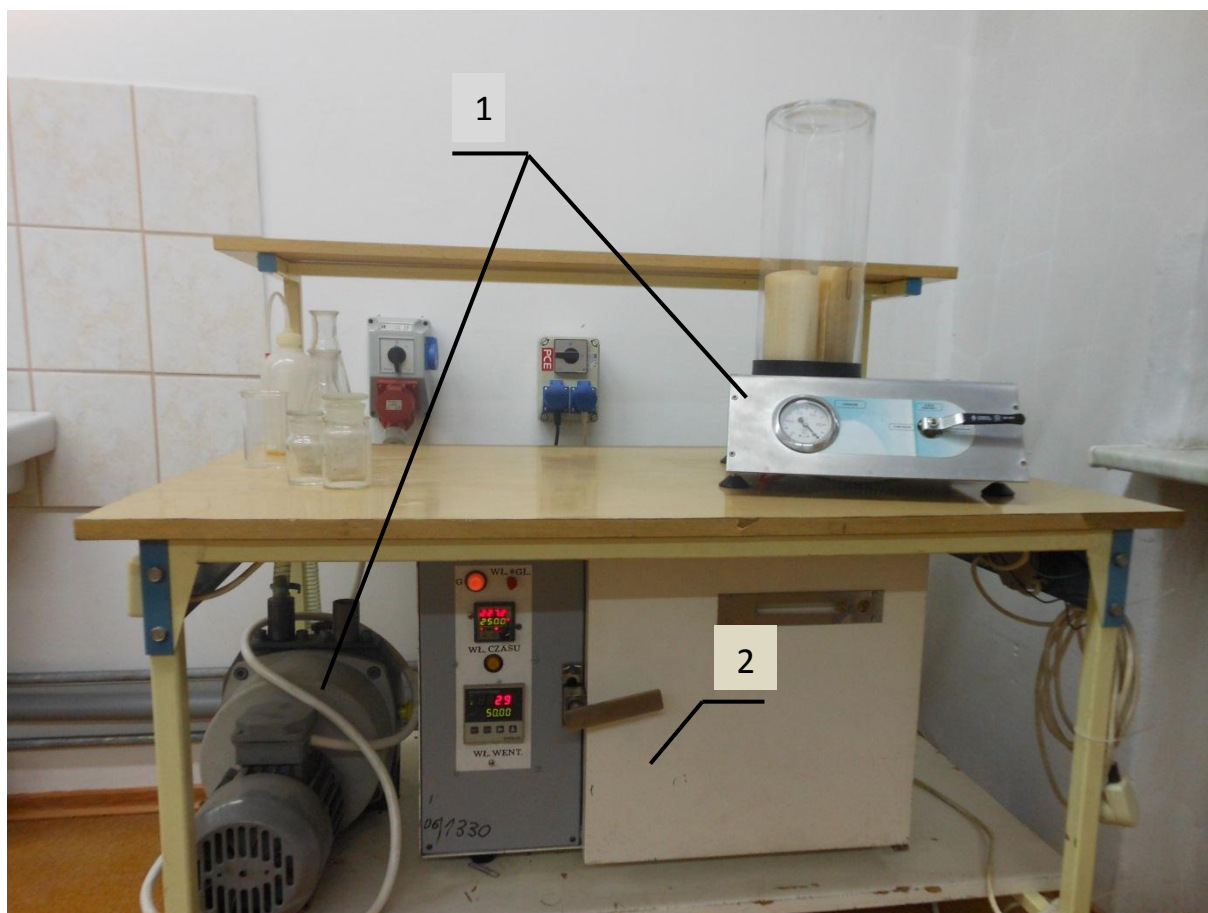
*dla kierunku maszynowego papieru.



Rys. 8.6. Waga laboratoryjna Fawag typu ONYX OX-200 wraz z próbką papieru aramidowego

poziomach zawilgocenia impregnowano w oleju i zamykano w hermetycznym pojemniku, w którym były sezonowane przez okres 14 dni w celu stabilizacji parametrów oraz uzyskania prawidłowego, stałego poziomu impregnacji próbek.

Na podstawie badań opisanych w podrozdziale 7.2 ustalony został również sposób wykonywania próbek o zróżnicowanym stopniu zesterzenia w wyniku wygrzewania ich w sterylizatorze w temperaturze 250°C przez odpowiednio: 0h, 50h, 100h, 150h, 200h, 250h. Uzyskane sześć typoszeregów izolacji o wskazanym poziomie zesterzenia, po procesie suszenia (100°C/24h) zostały, poddane zawilgacaniu zgodnie z opisaną procedurą. Ostatecznie uzyskano 24 rodzajów próbek o zróżnicowanym stopniu zawilgocenia i zesterzenia izolacji zgodnie z tabelą 8.6. Stanowisko do starzenia oraz suszenia próżniowego próbek papieru aramidowego prezentuje rysunek 8.7.



Rys. 8.7. Stanowisko do starzenia oraz suszenia próżniowego próbek papieru aramidowego:

1 – zestaw do suszenia papieru aramidowego (pompa próżniowa), 2 - sterylizator

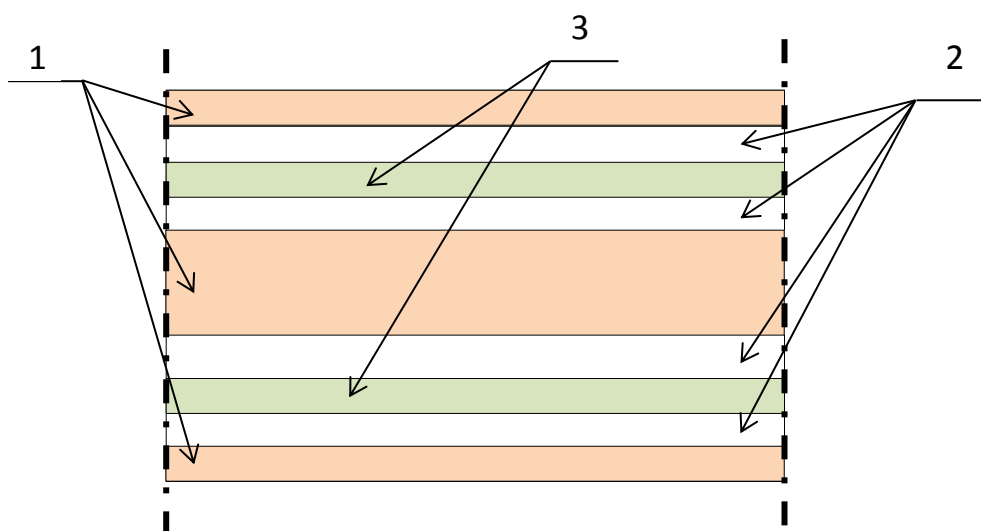
Tabela 8.4. Parametry techniczne izolacyjnego oleju mineralnego firmy Nynas typu Nytro 10GBN

Parametr	Wartość
Gęstość (kg/dm ³) dla temp. 20°C	0,886
Lepkość (mm ² /s) dla temp. 40 °C	8,9
Liczba kwasowa (mg KOH/g)	<0,01
Zawartość węglowodorów aromatycznych (%)	14
Zawilgocenie (ppm)	<20
Współczynnik stratności tgδ dla temp.90 °C, 50Hz	<0,001
Napięcie powierzchniowe (mN/m)	49
Napięcie przebicia (kV)	40-60

Tabela 8.5. Parametry techniczne ekologicznego estru syntetycznego Midel 7131

Parametr	Wartość
Gęstość (kg/dm ³) dla temp. 20°C	0,97
Lepkość (mm ² /s) dla temp. 40°C	28
Liczba kwasowa (mg KOH/g)	<0,03
Temperatura zapłonu (°C)	260
Temperatura krzepnięcia (°C)	-60
Współczynnik stratności tgδ dla temp.90 °C, 50Hz	<0,008
Zawartość wody (mg/kg)	50
Napięcie przebicia (kV)	>75

Pojedyncza próbka przeznaczona do badań złożona była z dwóch prostokątnych kawałków izolacji aramidowej o wymiarach 137 mm x 700 mm, nawiniętych w formie zwijki kondensatorowej na elektrodę niskiego potencjału, oddzielonych elektrodą wysokiego potencjału. Sposób przygotowania próbki przedstawia rysunek 8.8. Elektrody niskiego potencjału stanowiła miedziana rurka o średnicy 24,5 mm, natomiast elektrodę wysokiego potencjału paski folii aluminiowej.



Rys. 8.8. Przekrój poprzeczny próbki izolacji. 1- elektroda niskiego potencjału, 2- izolacja aramidowo-olejowa, 3- elektroda wysokiego potencjału

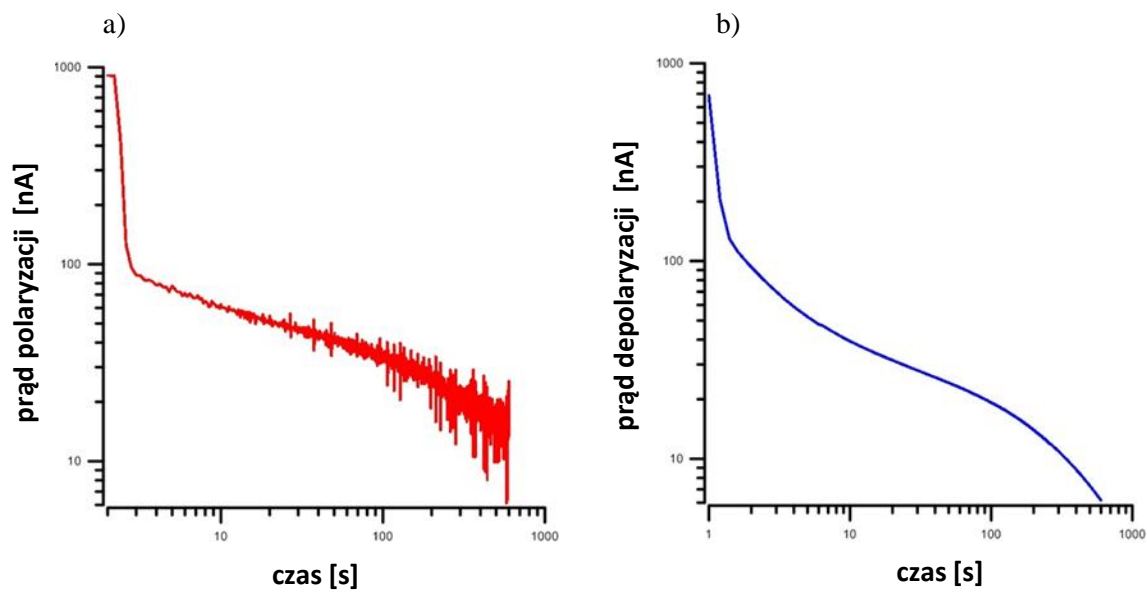
Tabela 8.6. Sposób oznaczania próbek izolacji aramidowo-olejowej, o zróżnicowanym stopniu zesterzenia i zawilgocenia

IA	IB	IC	ID
IIA	IIB	IIC	IID
IIIA	IIIB	IIIC	IIID
IVA	IVB	IVC	IVD
VA	VB	VC	VD
VIA	VIB	VIC	VID

A- zawilgocenie początkowe (bezpośrednio po osuszeniu papieru, ok. 0,5%)
 B- zawilgocenie A plus wzrost wagi o 1%
 C- zawilgocenie A plus wzrost wagi o 2%
 D- zawilgocenie A plus wzrost wagi o 3%
 I – papier niezestaryzony (suszenie 100°C pod próżnią)
 II- papier zestarzony w temp 250°C przez 50h
 III- papier zestarzony w temp. 250°C przez 100h
 IV- papier zestarzony w temp. 250°C przez 150h
 V- papier zestarzony w temp. 250°C przez 200h
 VI- papier zestarzony w temp. 250°C przez 250h

8.3. Sposób wykonywania pomiarów

Pomiary prądów polaryzacji i depolaryzacji zgodnie z opisaną w podrozdziale 6.2.1 metodą PDC zostały wykonane dla każdego rodzaju próbek oznaczonych zgodnie z tabelą 8.6. W celu przeanalizowania wpływu temperatury izolacji aramidowo-olejowej na prąd depolaryzacji pomiary wykonano w pełnym zakresie temperatur, tj. od 20°C do 70°C ze zmianą co 10°C. Komplet pomiarów został wykonany zarówno dla oleju mineralnego Nytro 10GBN jak również dla estru syntetycznego Midel 7131. Na podstawie literatury oraz badań wstępnych ustalono wartość napięcia ładowania U_c na poziomie 50 V (miernik Megger BM25) oraz całkowity czas pomiaru odpowiednio 600 s polaryzacja i 600 s depolaryzacja [56, 87]. Po tym okresie czasu w przypadku prądu polaryzacji obserwowano jego ustalenie się na poziomie wartości odpowiadającej prądowi wynikającemu ze skończonej wartości rezystywności skrośnej próbki. W przypadku prądu depolaryzacji po upływie 600s obserwowano jego zanikanie do wartości trudno mierzalnych. Przykładowy przebieg prądów polaryzacji i depolaryzacji w funkcji czasu dla losowo dobranej próbki AI przedstawiono na rysunku 8.9. Po umieszczeniu rozładowanej izolacji w polu napięcia stałego wartość prądu zależna jest od stałej czasowej wynikającej z przewodności warstwy izolacyjnej oraz jest związana z aktywnością różnych procesów polaryzacji/depolaryzacji w badanym materiale izolacyjnym. Jego wartość zanika wraz z procesem porządkowania dipoli występujących w materiale izolacyjnym, aż do momentu osiągnięcia stanu równowagi. Po usunięciu wymuszenia następuje proces depolaryzacji polegający na zjawisku relaksacji, który wymusza przepływ prądu w przeciwnym kierunku [57, 89]. Proces załączania i wyłączania napięcia polaryzacji oraz proces zwierania elektrod umożliwiających depolaryzację izolacji był w pełni zautomatyzowany dzięki dedykowanemu układowi mikroprocesorowemu sprzężonemu z układem przekaźników kontaktronowych typu K-552H. Pomiar i zapis wyników zrealizowano po stronie toru niskoprądowego elektrometru Keithley 6517A za pomocą złącza RS232 połączonego z komputerem rejestrującym z częstotliwością 5 Hz zmierzone wartości prądu.



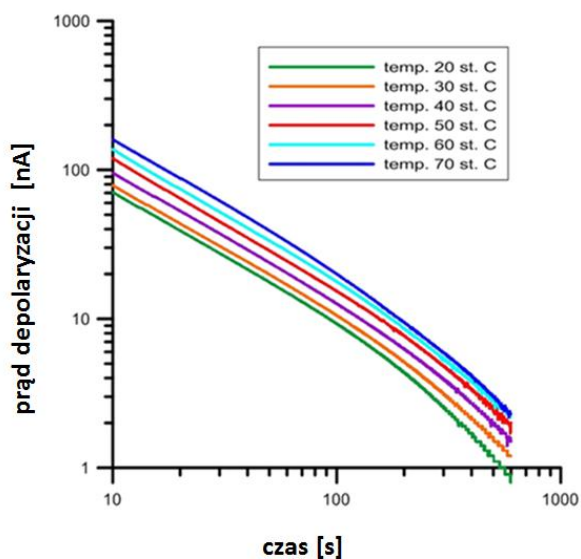
Rys. 8.9. Przykładowe przebiegi prądów a) polaryzacji, b) depolaryzacji, przy napięciu polaryzacji 100V. Próbki izolacji aramid-olej mineralny w temperaturze układu 26°C

9. Wyniki pomiarów prądu depolaryzacji izolacji aramidowo-olejowej

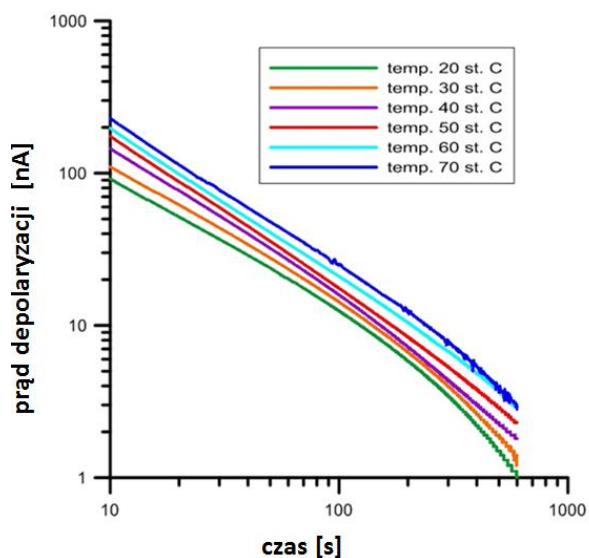
9.1. Analiza wpływu temperatury

Diagnostyka stanu izolacji celulozowo-olejowej transformatorów energetycznych wykonywana metodą PDC wymaga uwzględnienia oddziaływania temperatury na rejestrowane charakterystyki prądów polaryzacji i depolaryzacji [60]. Brak informacji o

a)

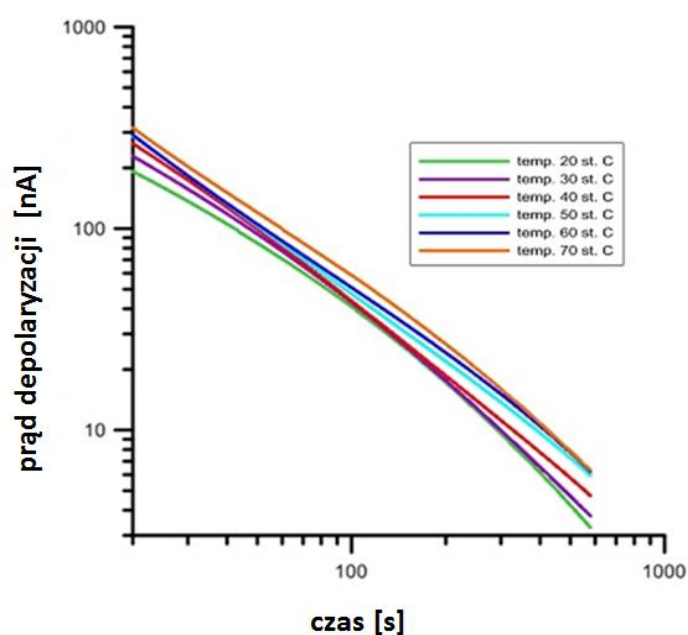


b)



Rys. 9.1. Wpływ temperatury izolacji aramid-olej mineralny Nytro 10GBN na prąd depolaryzacji dla próbki typu: a- IC oraz b-ID

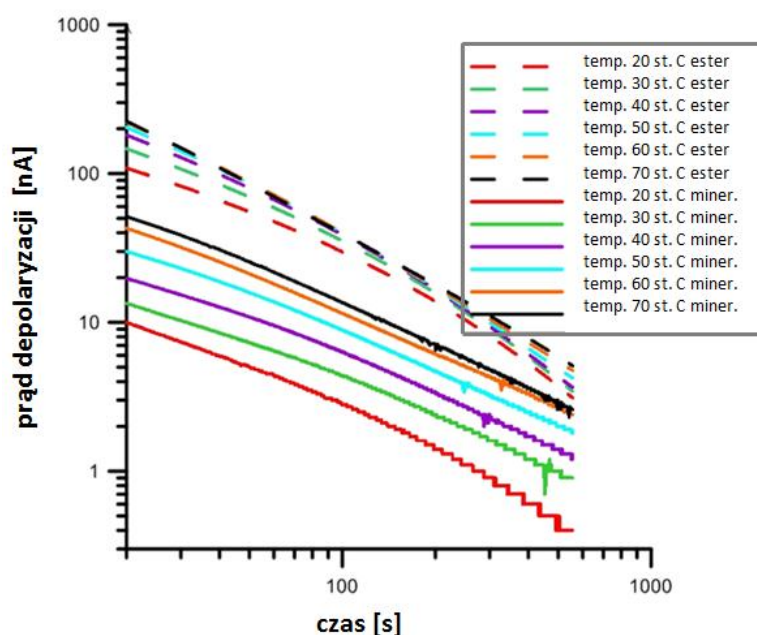
temperaturze badanej izolacji bądź podawanie błędnych wartości w praktyce uniemożliwia wiarygodne szacowanie stopnia jej zawilgocenia. Tym samym, również w przypadku badanych próbek izolacji aramidowo-olejowej niezbędne było przeanalizowanie oddziaływania temperatury na rejestrowane charakterystyki metodą PDC. Ponieważ w praktyce diagnostycznej zdecydowanie częściej analizuje się czasowe charakterystyki prądu depolaryzacji aniżeli polaryzacji, postanowiono ograniczyć zakres prezentowanych danych do tego typu charakterystyk. Ograniczenie to wynika z faktu, że charakterystyki prądu depolaryzacji są w znacznej mierze zależne od doboru wartości napięcia polaryzującego, zgromadzonego skutkiem wcześniejszych polaryzacji ładunku, wartości prądu upływu, nieliniowych zjawisk polaryzacji, obecności dużego ładunku przestrzennego, polaryzacji typu Maxwella-Wagnera, ładunku elektrostatycznego, itp. Większości wymienionych oddziaływań, które niewątpliwie utrudniają prawidłową analizę charakterystyk, pozbawione są natomiast czasowe charakterystyki prądu depolaryzacji. Wykonywane badania uwzględniały zakres temperatur od 20°C do 70°C – typowy zakres temperatur występujący podczas diagnostyki PDC stosowanej w transformatorach energetycznych [39]. Zarejestrowane zmiany wartości prądu depolaryzacji w funkcji temperatury dla wybranych próbek przedstawiono na rysunku 9.1, dla oleju mineralnego Nytro 10GBN oraz rysunku 9.2 dla estru syntetycznego Midel 7131. Wzrost temperatury izolacji aramidowo-olejowej



Rys. 9.2. Wpływ temperatury izolacji aramid- ester syntetyczny Midel 7131 na prąd depolaryzacji dla próbki typu IID

pociąga za sobą wzrost wartości prądu depolaryzacji, zarówno w przypadku oleju mineralnego jak i w przypadku estru syntetycznego. Wskazuje to na silną zależność przewodności badanej izolacji aramidowo-olejowej od temperatury.

Porównując wpływ oddziaływania temperatury izolacji na próbki papieru aramidowego znajdujące się w środowisku oleju mineralnego oraz w środowisku estru syntetycznego można stwierdzić, że temperatura izolacji ma znacznie mniejszy wpływ na zmiany wartości prądu depolaryzacji w przypadku zastosowania estru Midel 7131 niż w przypadku oleju Nytro 10GBN. Zjawisko to wynika ze znacznie lepszych parametrów izolacyjnych zastosowanego estru syntetycznego w porównaniu do oleju mineralnego. Różnica właściwości zastosowanych płynów izolacyjnych widoczna jest także w wartościach prądów depolaryzacji, które w przypadku zastosowania oleju mineralnego jest znacznie niższy co szczególnie jest widoczne w pierwszym etapie procesu depolaryzacji. Celem porównania tego zjawiska, wyniki przykładowych pomiarów wykonanych na próbce typu AV przedstawiono na rysunku 9.3.



Rys. 9.3 Rodziny charakterystyk prądów depolaryzacji w funkcji czasu, dla próbek typu VA w środowisku oleju mineralnego Nytro 10GBN oraz estru syntetycznego Midel 7131

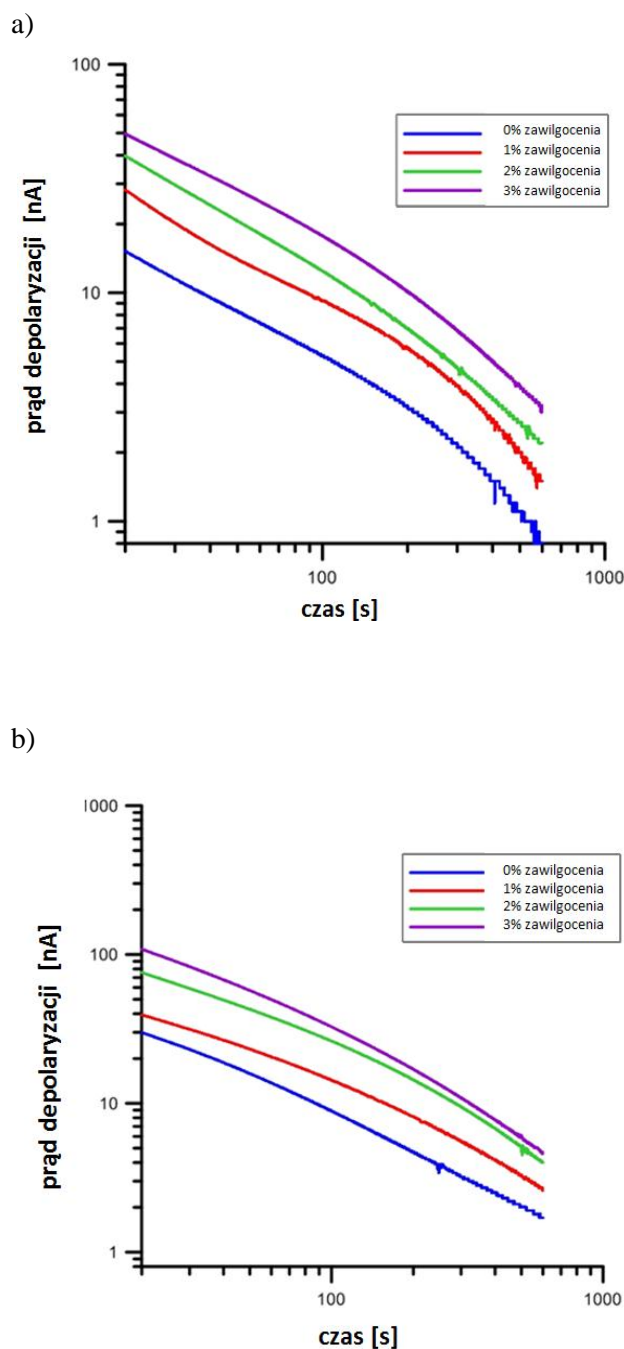
Ostatecznie jednak stwierdzić należy, że diagnostyka stanu izolacji aramidowo-olejowej wykonana metodą PDC wymaga niewątpliwie uwzględnienia oddziaływania temperatury, w podobny sposób jak ma to miejsce w przypadku izolacji celulozowo-olejowej. Ewentualne błędne określenie wartości temperatury generowało będzie mniejszy błąd oceny

stanu izolacji w pełnym wykonaniu syntetycznym, tj. w połączeniu aramid-ester. Opisane obserwacje miały miejsce dla wszystkich badanych próbek izolacji, tzn. niezależnie od stopnia zawilgocenia czy zesterzenia aramidu (tab. 8.6).

9.2. Analiza wpływu stopnia zawilgocenia

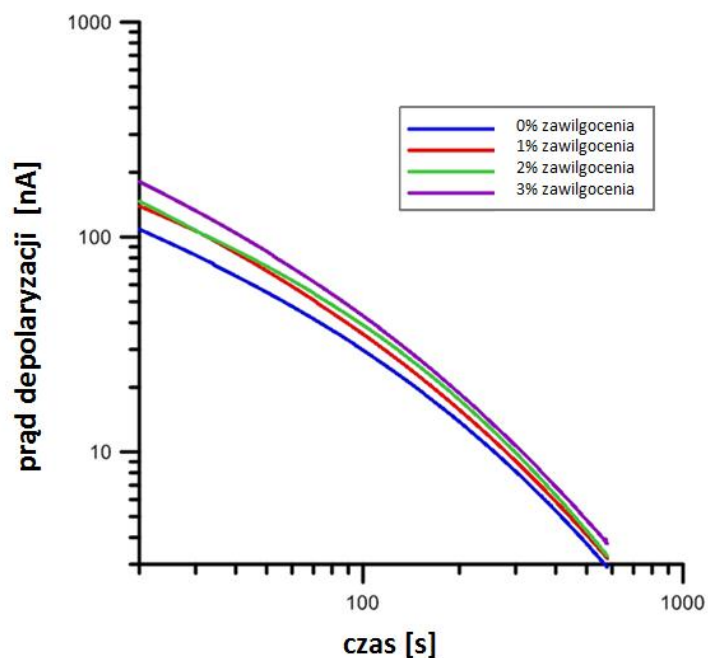
Bardzo ważnym czynnikiem, który należy uwzględnić podczas analizy prądów depolaryzacji mających służyć do określenia stopnia degradacji izolacji aramidowej, jest stopień zawilgocenia całego systemu izolacyjnego. Jedną z pozytywnych właściwości izolacji aramidowej jest znacznie mniejsza pochłaniałość wilgoci z otoczenia ze względu na swoją budowę oraz brak występowania zjawiska powstawania dodatkowego zawilgocenia, występującego w przypadku rozkładu izolacji celulozowej. Zgodnie z tabelą 8.6 próbki podzielone zostały na cztery poziomy zawilgocenia izolacji tj. 0%, 1%, 2% oraz 3%. Zgodnie z wartościami zawilgocenia izolacji występującymi w eksploatowanych transformatorach, która w przypadku nowych jednostek wynosi $\sim 0,5\%$, a dla użytkowanych kilkadziesiąt lat ok. 3% (ten poziom zawilgocenia izolacji, klasyfikuje transformator do grupy wysokiego ryzyka) [2, 84], dobrany zakres zawilgocenia badanych próbek izolacji aramidowo-olejowej praktycznie pokrywa wszystkie przypadki mogące występować w praktyce diagnostycznej. Wpływ zawilgocenia na wartość prądu depolaryzacji na wybrane próbki przedstawia rys. 9.4. Wzrost zawilgocenia pociąga za sobą znaczny wzrost wartości prądu depolaryzacji. Różnice między poszczególnymi wartościami zawilgocenia są szczególnie widoczne w przypadku podwyższonej temperatury izolacji, tzn. powyżej 50°C . Ponadto istotne jest, że charakterystyki prądu depolaryzacji w prezentowanym oknie czasowym nie przecinają się ze sobą co pomyślnie rokuje jeżeli chodzi o ewentualną adaptację metody PDC do diagnostyki stopnia zawilgocenia papieru aramidowego nasyconego mineralnym olejem izolacyjnym.

Niestety w przypadku papieru aramidowego nasyconego estrem syntetycznym Midel 7131, tzn. dla izolacji w pełnym wykonaniu syntetycznym, wpływ stopnia zawilgocenia aramidu na charakterystyki prądu depolaryzacji jest zdecydowanie słabszy (rys. 9.5). Praktycznie jedynie dla skrajnych zawilgoczeń tzn. próbek oznaczonych jako A oraz D (tab. 8.6), można zauważyć istotny i powtarzalny wzrost prądu depolaryzacji. Prawdopodobnie przyczyny zaobserwowanego zjawiska należy upatrywać w większej polarności estru syntetycznego niż oleju mineralnego (większa wartość przenikalności elektrycznej względnej) oraz w nieco innym mechanizmie magazynowania cząsteczek wody w tych cieczach. Większa polarność estru syntetycznego może maskować drobne zmiany stopnia zawilgocenia papieru aramidowego. Ponadto ustalenie równowagi hydrodynamicznej między

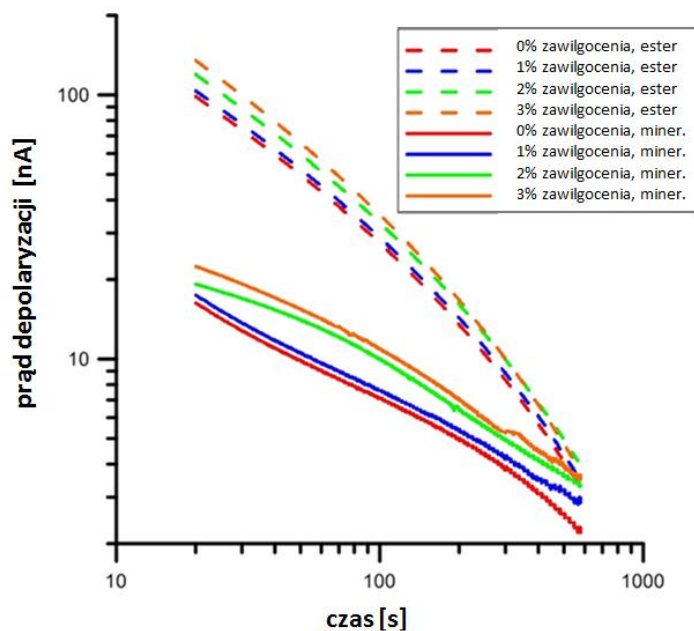


Rys. 9.4. Wpływ stopnia zawilgocenia izolacji aramid-olej mineralny Nytro 10GBN na wartość prądu depolaryzacji dla wybranych próbek, a- zestarzenie typu III w temperaturze 50°C, b- zestarzenie typu V w temperaturze 60°C

estrem, a papierem aramidowym może przebiegać nieco dłużej. Na chwilę obecną brak jest doniesień literaturowych na ten temat. Również transformatory energetyczne z pełną izolacją syntetyczną są praktycznie na etapie testów pierwszych prototypów, brakuje tym samym wiedzy eksperckiej.



Rys. 9.5. Wpływ stopnia zawilgocenia izolacji aramid-ester syntetyczny Midel 7131 na wartość prądu depolaryzacji dla wybranego rodzaju próbki (zestarzenie typu V w temperaturze 20°C)



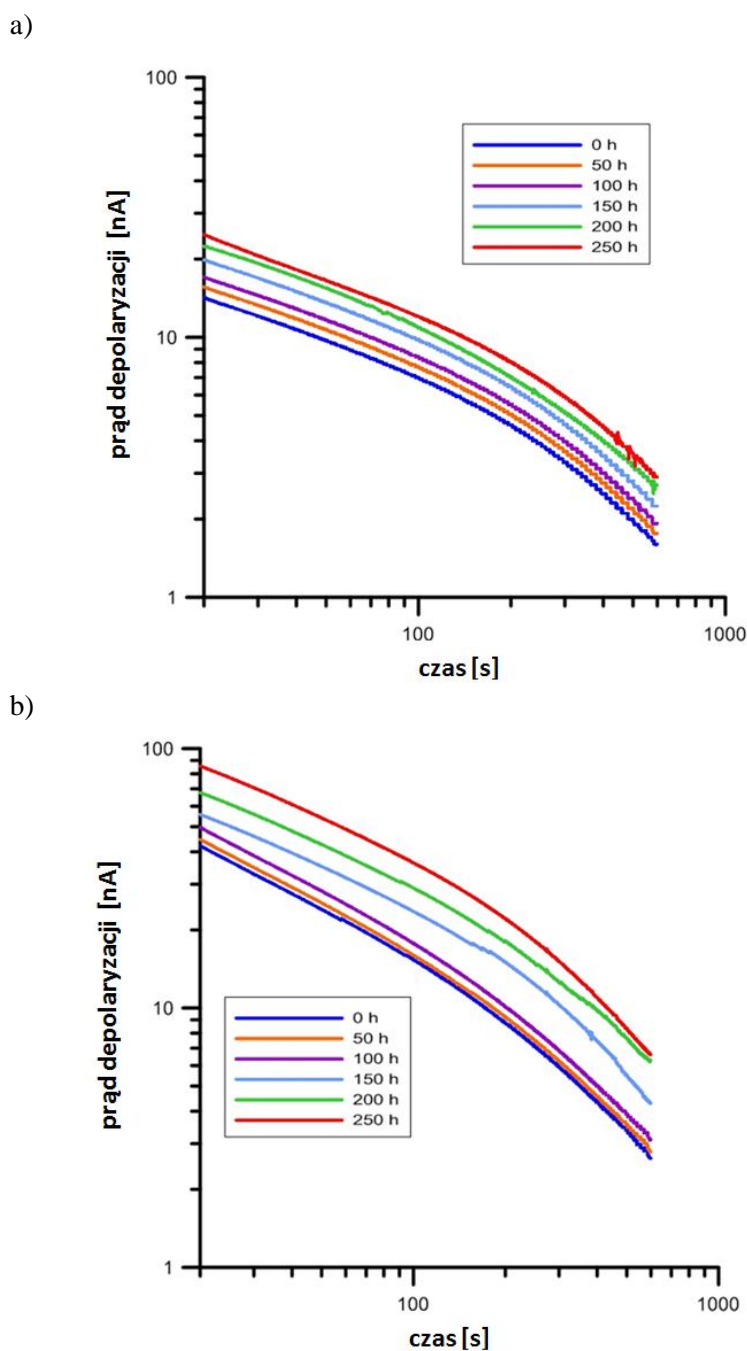
Rys. 9.6. Wpływ stopnia zawilgocenia izolacji aramidowo-olejowej na wartość prądu depolaryzacji dla wybranego rodzaju próbki (zestarzenie typu VI w temperaturze 20°C) dla oleju mineralnego Nytro 10GBN oraz estru syntetycznego Midel 7131

Rysunek 9.6 przedstawia porównanie wpływu stopnia zawilgocenia papieru aramidowego impregnowanego olejem mineralnym i estrem syntetycznym na rejestrowany prąd depolaryzacji dla losowo wybranej próbki. Zaobserwowano aż 10-krotny wzrost wartości prądu depolaryzacji dla czasu 10 s w przypadku impregnacji estrem syntetycznym. Dowodzi to zdecydowanie większej polarności izolacji w pełni syntetycznej, rozumianej jako zdolność do gromadzenia ładunku elektrycznego. Co istotne, zanik prądu depolaryzacji następował niemalże w tym samym, niezależnie od rodzaju impregnacji. Dowodzi to, że w przypadku izolacji z papierem aramidowym, podobnie jak w klasycznej izolacji celulozowo-olejowej, o początkowym przebiegu prądu depolaryzacji decydują własności impregnatu, natomiast w części końcowej charakterystyki własności izolacji stałej. Stwierdzić zatem można, że diagnostyka stopnia zawilgocenia izolacji aramidowo-olejowej wykonana metodą PDC jest możliwa, a procedura szacowania zawartości wody w papierze aramidowym może odbywać się na podobnej zasadzie jak w przypadku izolacji celulozowo-olejowej. Dodać jednakże należy, że izolacja w pełni syntetyczna będzie trudniejsza w opisywanej diagnostyce stopnia zawilgocenia. Opisane obserwacje potwierdziły się dla wszystkich stopni zasterzenia próbek oraz w całym zakresie temperatur.

9.3. Analiza wpływu stopnia zasterzenia

Przeprowadzona w podrozdziałach 9.1 i 9.2 analiza wpływu temperatury oraz stopnia zawilgocenia na prąd depolaryzacji izolacji aramidowo-olejowej, umożliwiła ocenę wpływu stopnia zasterzenia, rozumianego jako degradacji termicznej włókien aramidu. W przypadku izolacji aramid-olej mineralny wpływ kolejnych stopni starzenia izolacji pociąga za sobą wzrost wartości prądu depolaryzacji, co jest widoczne na rys. 9.7.

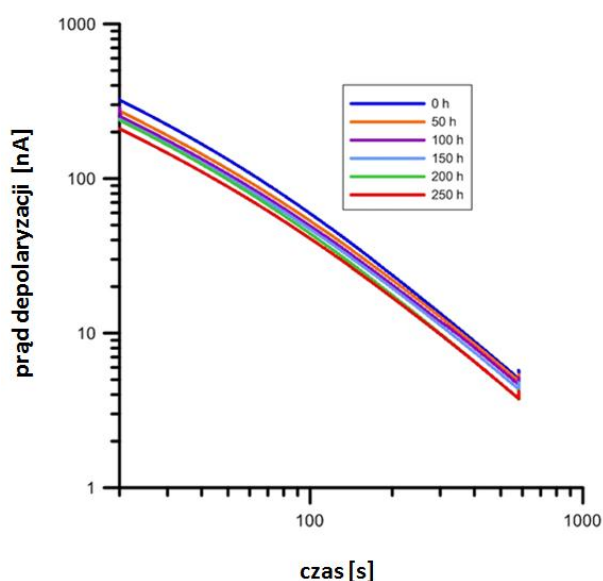
Istotnym jest, że obserwowany wzrost prądu depolaryzacji na miejsce w całym oknie czasowym, podobnie jak w przypadku analiz wpływu stopnia zawilgocenia (rys. 9.4). Oznacza to, że w praktyce diagnostycznej wykonywanej metody PDC, trudno będzie odseparować wpływ stopnia zawilgocenia od stopnia zasterzenia, analizując charakterystyki prądu depolaryzacji dla izolacji wykonanej z papieru aramidowego impregnowanego olejem mineralnym mimo to ważne jest, że wzrost stopnia degradacji termicznej włókien aramidu wywiera istotną, mierzalną i powtarzalną zmianę ilościową na charakterystykach prądu depolaryzacji w przeciwieństwie do starzonej klasycznie izolacji celulozowo-olejowej [107].



Rys. 9.7. Wpływ stopnia termicznej degradacji izolacji aramidowo-olejowej (mineralny) na wartość prądu depolaryzacji dla wybranego rodzaju próbki, a- zawilgocenie 1%, w temperaturze układu izolacji 30°C, b- zawilgocenie 3%, w temperaturze układu izolacji 50°C

Zakładając, że w hermetycznym transformatorze z izolacją celulozowo-olejową, podstawowym źródłem wody gromadzonej w izolacji stałej są reakcje utleniania i hydrolizy makrocząsteczek celulozy (jeden z produktów starzenia), w transformatorze z izolacją aramidowo-olejową źródłem wody będzie jedynie sam olej. Dopuszczalne zawilgocenie oleju

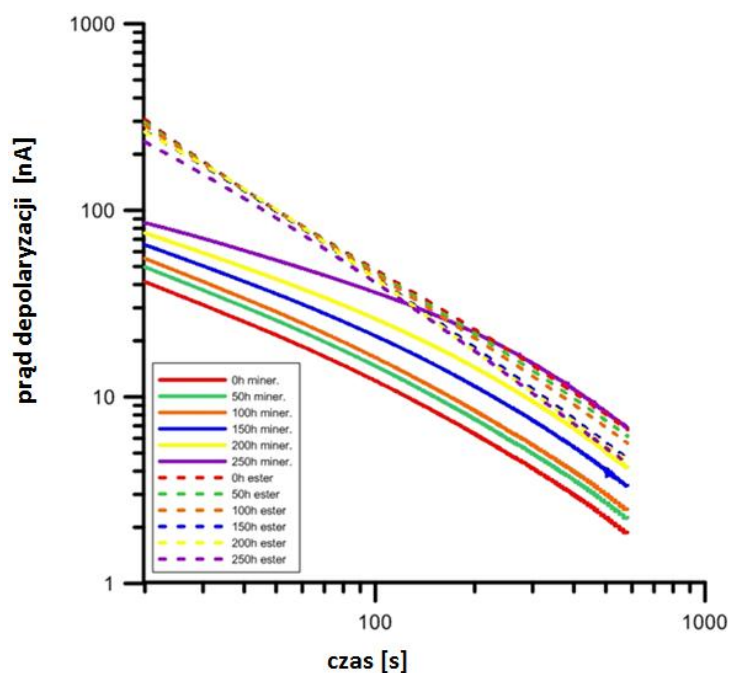
mineralnego przeznaczonego do napełnienia transformatorów najwyższych mocy nie może przekraczać 10ppm. Jest to wartość znikoma w porównaniu do procentowego zawilgocenia aramidu. O ile transformator nie ulegnie dehermetyzacji założyć można, że przez lata eksploatacji w transformatorze ustali się stały poziom zawilgocenia izolacji aramidowej. Wówczas zmiany na charakterystykach prądu depolaryzacji determinowane będą jedynie poprzez oddziaływanie temperatury oraz wpływ stopnia zesterzenia. Niestety na chwilę obecną, z uwagi na znikomą małą liczbę transformatorów z tym typem izolacji, brak jest informacji pochodzących z eksploatacji, które potwierdziłyby przedstawioną tezę.



Rys. 9.8. Wpływ stopnia termicznej degradacji izolacji aramid-ester syntetyczny Midel 7131 na wartość prądu depolaryzacji dla wybranego rodzaju próbki (zawilgocenie 2%, w temperaturze 40°C)

Zdecydowanie odmienny wpływ stopnia zesterzenia papieru aramidowego impregnowanego estrem syntetycznym na charakterystyki prądu depolaryzacji prezentuje rysunek 9.8. Zaobserwowano trudno mierzalną zmianę, polegającą na obniżeniu wartości rejestrowanego prądu depolaryzacji wraz z rosnącym zesterzeniem. Jednakże, zaobserwowana zmiana okazała się znikoma, oscylująca w pobliżu błędu pomiarowego oraz niepowtarzalna (rys. 9.9). Przyczynę zjawiska upatrywać można w znacznej polarności samej cieczy izolacyjnej, która maskuje zmiany prądu depolaryzacji, wynikające z rosnącego zesterzenia aramidu. Wniosek ten potwierdza zbiorczy rysunek 9.9, szczególnie analizując wartości prądu depolaryzacji dla czasów najdłuższych. Tym samym stwierdzić należy, że szacowanie stopnia zesterzenia izolacji aramidowej impregnowanej estrem syntetycznym jest

praktycznie niemożliwe dla metody PDC. Opisane w podrozdziale 9.3. A wnioski i obserwacje potwierdziły się dla wszystkich stopni zawilgocenia próbek oraz w całym zakresie temperatur.



Rys. 9.9. Wpływ stopnia zesterzenia izolacji aramidowo-olejowej na wartość prądu depolaryzacji dla wybranego rodzaju próbki (zawilgocenie 2%, w temperaturze 50°C) dla oleju mineralnego Nytro 10GBN oraz estru syntetycznego Midel 7131

9.4. Podsumowanie wyników

Wykonane badania wykazały istotny wpływ analizowanych procesów zachodzących w izolacji aramidowo-olejowej na charakterystyki prądu depolaryzacji. W przypadku izolacji z impregnowanej olejem mineralnym podniesienie wartości któregośkolwiek parametru – zesterzenia, zawilgocenia czy temperatury układu – pociągało za sobą wyraźny wpływ objawiający się wzrostem wartości prądu depolaryzacji.

W przypadku papieru aramidowego impregnowanego estrem syntetycznym Midel 7131 rejestrowane zmiany w prądzie depolaryzacji już nie były tak znaczne jak dla impregnacji olejem mineralnym Nytro 10GBN. Ogólnie stwierdzić można, że impregnacja estrem syntetycznym istotnie zwiększa wartość prądu depolaryzacji w porównaniu z olejem

mineralnym, niezależnie od temperatury stopnia zawilgocenia czy zesterzenia aramidu. Trendy zmian wartości prądu depolaryzacji dla obydwu rodzajów impregnacji były takie same zarówno dla zmian wartości zawilgocenia aramidu jak i temperatury badanego układu izolacji. Stwierdzono brak istotnego i powtarzalnego wpływu stopnia zesterzenia aramidu na charakterystykach prądu depolaryzacji w przypadku impregnacji próbek estrem syntetycznym.

10. Badania powtarzalności i odtwarzalności wyników pomiarów

W celu sprawdzenia poprawności przeprowadzonych badań zaprezentowanych w poprzednich rozdziałach, dokonano oceny powtarzalności i odtwarzalności wyników pomiarowych. W rozdziale opisano również metodę przeprowadzenia pomiarów dla zastosowanych analiz statystycznych.

10.1. Wybrane testy istotności

Testy powtarzalności i odtwarzalności zostały przeprowadzone dla losowo wybranego typu próbki (seria IIIB zgodnie z tabelą 8.6), określony został dla niej czas pomiaru prądu depolaryzacji zgodnie z tabelą 10.1.

Tabela 10.1. Parametry losowo wylosowanej próbki i pomiarów

Rodzaj wylosowanej próbki	Poziom zaw. [%]	Temperatura układu [°C]	Czas prądu depolaryzacji [s]
III- papier zestarzony w temp. 250°C przez 100 h	1	40	20

Badania powtarzalności przeprowadzono na podstawie pomiarów prądu depolaryzacji wykonanych 10-krotnie każdego dnia, przez 5 kolejnych dni trwania eksperymentu. Odtwarzalność oszacowano testując 10-krotnie pięć kolejnych próbek o tych samych parametrach zesterzenia, zawilgocenia w tych samych warunkach temperaturowych. Wnioski z eksperymentów zostały wysunięte na podstawie parametrycznego testu istotności bazującego na analizie wariacji dla wielu średnich klasyfikacji pojedynczej [37, 55]. Test ten oparty jest na rozkładzie F Snedecora oraz założeniu, 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. Przed przystąpieniem do testu należało zbadać, 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 χ^2 [37, 106]. W tym celu dla wylosowanej próbki wykonano 50 pomiarów prądów depolaryzacji przy zachowaniu stałych parametrów pomiaru. Rozkład χ^2 opisuje równanie:

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

gdzie:

n – ogólna liczba wyników ($n=50$),

r – liczba rozłącznych klas wyników,

n_i – liczebność i -tej klasy,

p_i – prawdopodobieństwo wystąpienia badanej cechy w i -tej klasie.

Rezultat przeprowadzonych obliczeń potrzebnych do przeprowadzenia testu zgodności χ^2 dla wykonanych 50 pomiarów przedstawiony został w tabeli 10.2.

Tabela 10.2. Rozkład χ^2 wyznaczony z wyników uzyskanych podczas 50-krotnych pomiarów prądu depolaryzacji

Klasa (r)	Id [nA]	Liczba obserwacji (n_i)	χ^2
1	46,7 – 46,8	2	0,5599
2	46,8 – 46,9	3	0,0073
3	46,9 – 47,0	6	0,1854
4	47,0 – 47,1	10	0,1208
5	47,1 – 47,2	15	0,7595
6	47,2 – 47,3	7	0,3872
7	47,3 – 47,4	5	0,0562
8	47,4 – 47,5	2	0,0002
		50	2,0765

Hipotezy testu zakładają odpowiednio:

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

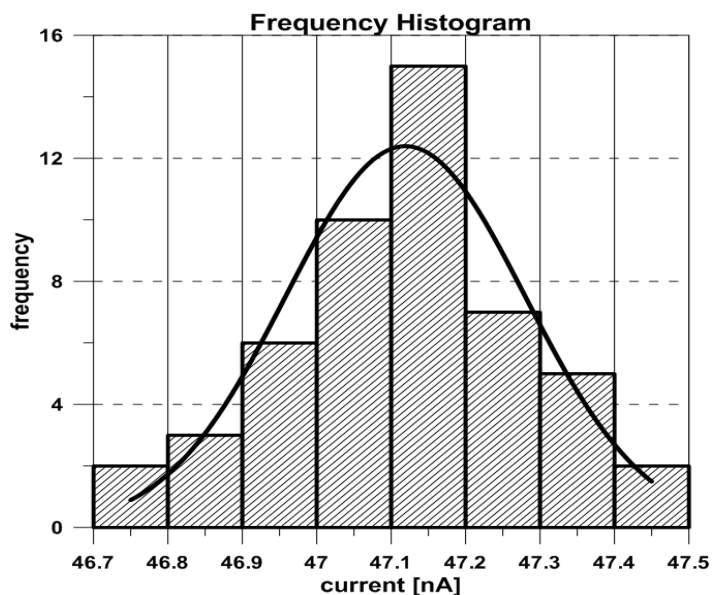
$H_1: F(x) \notin \Omega$

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

Tabela 10.3. Porównanie wartości χ^2 (odczytanej i obliczonej)

α	Stopnie swobody (r-1)	χ_{α}^2	χ^2
1. 0,05	7	14,0671	2,0765

W związku z zachodzącą ostrą nierównością $\chi^2 = 2,0765 < 14,067140 = \chi_{\alpha}^2$ nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 , wskazującej, że uzyskany rozkład wyników w formie prądów depolaryzacji jest typu normalnego. Wyniki testu przedstawiono na rysunku 10.1.



Rys. 10.1. Rozkład wyników pomiarów prądu depolaryzacji

Równość wariacji danych dla sprawdzenia powtarzalności wyników prądu depolaryzacji została zbadana w oparciu o test jednorodności wielu wariacji. Test ten oparty jest również na rozkładzie χ^2 oraz założeniu, iż danych jest k populacji normalnych $N(m_i, \sigma_i)$, gdzie $i=1,2,\dots,k$, o liczebnościach n_i . Rozkład χ^2 opisują następujące równania [37,106]:

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

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

oraz:

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

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

gdzie:

x_{ij} – wynik kolejnej próby

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

W celu przeprowadzenia testów powtarzalności wyników, przez pięć kolejnych dni przeprowadzono badania w ramach jednej próbki. Codziennie wykonywanych było dziesięć pełnych cykli polaryzacji i depolaryzacji próbki, oraz pomiar prądu depolaryzacji zgodnie z tabelą 10.1. Dane pomiarowe do obliczeń przedstawione zostały w tabeli 10.4.

Tabela 10.4. Wyniki pomiarów prądów depolaryzacji [nA] próbki IIB zestawione celem przeprowadzenia testu powtarzalności pomiarów

Próbka o parametrach IIB (papier aramidowy zestarzony w temp. 250°C przez 100 h o zawilgoceniu 1%)					
Pomiar (k)	1 dzień	2 dzień	3 dzień	4 dzień	5 dzień
1	47,25	47,25	46,9	47,25	47,15
2	47,45	46,85	47,15	47,05	47,35
3	46,95	47,15	47,35	47,15	47,25
4	47,25	47,15	46,85	46,75	47,35
5	47,35	46,95	47,05	47,05	47,15
6	46,95	47,15	47,25	47,15	47,35
7	47,45	47,05	46,85	47,25	47,15
8	47,35	47,05	47,15	47,15	47,25
9	46,95	46,8	47,05	47,15	46,95
10	47,25	47,05	47,35	46,85	47,25

Hipotezy testu jednorodności wielu wariacji zakładają odpowiednio:

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

gdzie σ jest wariancją danej populacji,

H_1 : nie wszystkie wariancje wyników są sobie równe.

Obliczoną wartość rozkładu χ^2 oraz odczytaną z tabeli dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$ przedstawia tabela 10.5.

Tabela 10.5. Obliczona i odczytana z tabeli wartość rozkładu χ^2 dla testu jednorodności wielu wariacji

α	Stopnie swobody (k-1)	χ_{α}^2	χ^2
0,01	4	13,2767	2,5352

Zachodząca nierówność $\chi_\alpha^2 = 13,2767 > 2,5352 = \chi^2$ wskazuje, iż nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 twierzącej, że wszystkie wariancje wyników prądów depolaryzacji 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 poniższe 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:

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

Hipotezy testu zakładają odpowiednio [39]:

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

gdzie m jest średnią z populacji,

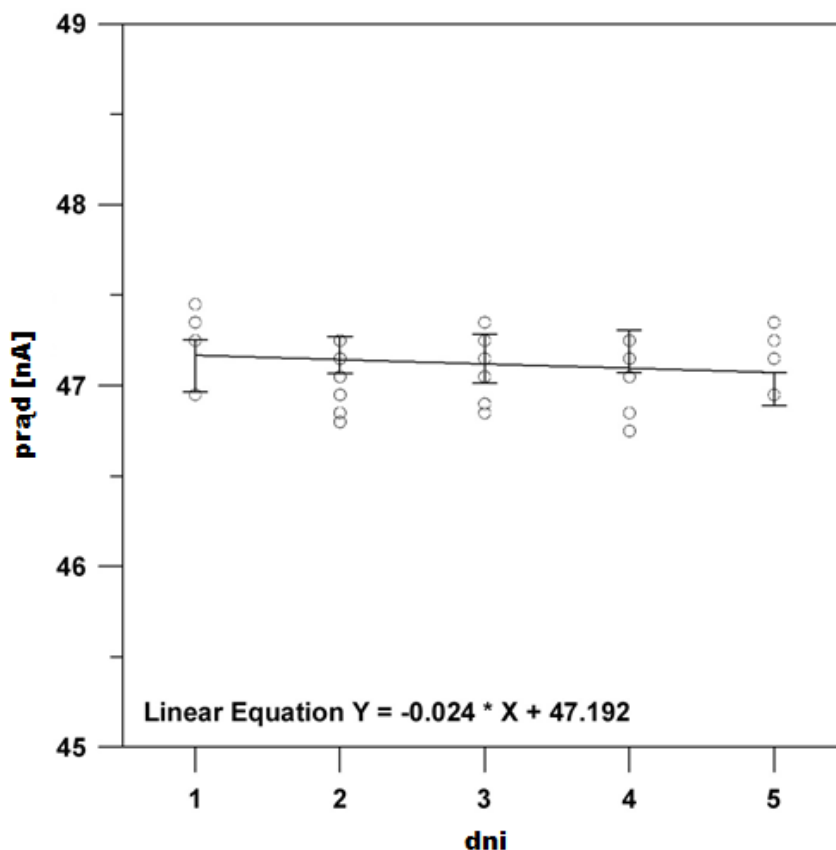
H_1 : nie wszystkie średnie są sobie równe.

Tabela 10.6 przedstawia porównanie obliczonej i odczytanej wartości rozkładu F dla poziomu istotności $\alpha=0,05$.

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

α	1 stopień swobody (k-1)	2 stopień swobody (n-k)	F_α	F
0,05	4	45	2,5787	2,4466

Zachodząca nierówność $F_{\alpha} = 2,5787 > 2,4466 = F$ wskazuje, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 twierzącej, że wszystkie średnie wyników prądów depolaryzacji są sobie równe. Dowodzi to jednocześnie, że w wybranym parametrze pomiarowym zachodzi powtarzalność wyników eksperymentalnych z 5%-ową tolerancją błędów. Otrzymany wynik w formie graficznej przedstawiony jest na rysunku 10.2.



Rys. 10.2. Powtarzalność wyników pomiaru prądów depolaryzacji

W celu przeprowadzenia testów odtwarzalności wyników pomiaru zostały wykonane dla pięciu próbek o tych samych parametrach zesterzenia i zawilgocenia. Dla każdej próbki wykonywanych zostało dziesięć pełnych cykli polaryzacji i depolaryzacji, oraz pomiar prądu depolaryzacji zgodnie z tabelą 10.1. Dane pomiarowe do obliczeń przedstawione zostały w tabeli 10.7.

Tabela 10.7. Wyniki pomiarów prądów depolaryzacji [nA] próbek IIIB zestawione celem przeprowadzenia testu powtarzalności pomiarów.

Próbki o parametrach IIIB (papier aramidowy zestarzony w temp. 250°C przez 100 h o zawilgoceniu 1%)					
Pomiar (k)	1 próbka	2 próbka	3 próbka	4 próbka	5 próbka
1	46,95	47,35	46,95	46,85	46,95
2	47,25	47,05	47,25	47,15	47,25
3	47,15	47,25	47,15	46,75	47,15
4	46,95	47,15	47,25	47,05	47,25
5	47,25	47,05	46,95	47,15	46,95
6	47,15	47,55	47,15	46,95	47,15
7	47,05	47,35	47,45	47,15	47,45
8	46,95	47,05	46,95	47,15	46,95
9	47,35	47,25	47,25	47,05	47,25
10	47,55	47,45	47,15	46,95	47,15

Procedura przeprowadzenia obliczeń w badań odtwarzalności pomiarów wykonana została w analogiczny sposób jak w przypadku powtarzalności pomiarów. Hipotezy testu 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.

Otrzymane wyniki obliczeń przedstawione zostały w tabeli 10.8.

Tabela 10.8. Obliczona i odczytana z tabeli wartość rozkładu χ^2 dla testu jednorodności wielu wariacji.

α	Stopnie swobody (k-1)	χ_{α}^2	χ^2
0,01	4	13,2767	0,9925

Zachodząca nierówność $\chi_{\alpha}^2 = 13,2767 > 0,9925 = \chi^2$ wskazuje, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 twierdzącej, że wszystkie wariancje wyników prądów depolaryzacji są sobie równe. Dane przedstawione w tabeli 10.7 można więc opisać rozkładem normalnym a ich wariancje są sobie równe. Zatem hipotezy testu analizy wariancji dla wielu średnich zakładają odpowiednio:

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

gdzie m jest średnią z populacji,

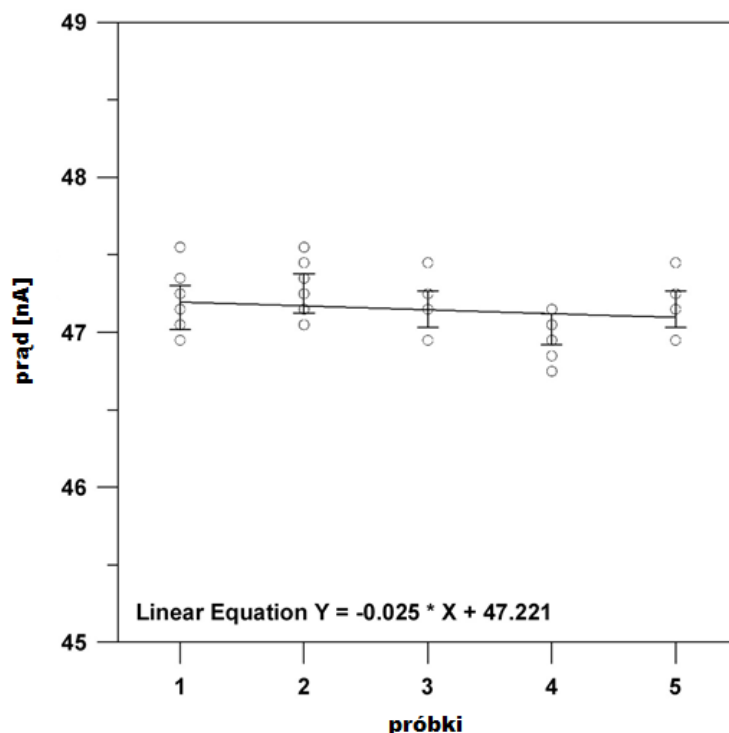
$$H_1: \text{nie wszystkie średnie są sobie równe.}$$

Tabela 10.9 przedstawia porównanie obliczonej i odczytanej wartości rozkładu F dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

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

α	1 stopień swobody (k-1)	2 stopień swobody (n-k)	F_{α}	F
0,05	4	45	2,5787	2,3477

Zachodząca nierówność $F_{\alpha} = 2,5787 > 2,3477 = F$ wskazuje, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy H_0 twierdzącej, że wszystkie średnie wyników prądów depolaryzacji są sobie równe. Dowodzi to jednocześnie, że w wybranym parametrze pomiarowym zachodzi odtwarzalność wyników eksperymentalnych z 5%-tą tolerancją błędów. Otrzymany wynik w formie graficznej przedstawiony jest na rysunku 10.3.



Rys. 10.3. Odtwarzalność wyników pomiaru prądów depolaryzacji

10.2. Podsumowanie wyników badań statystycznych

Poprawność opisanej metody pomiarowej została wykazana poprzez wykonanie szeregu pomiarów w zakresie parametrycznych i nieparametrycznych testów istotności. Kluczowym warunkiem uzyskania prawidłowych wyników wydaje się utrzymanie szczególnej staranności w przygotowywaniu próbek pod względem ich starzenia oraz kontrolowanemu stopniowi ich zawilgocenia. Dodatkowo nadzór nad utrzymaniem stałej kontroli temperatury badanego układu wpłynął na dobrą powtarzalność dokonanych pomiarów.

Wykonane testy pozwoliły stwierdzić, iż:

- rozkład wyników pomiarów prądów depolaryzacji jest zgodny z rozkładem normalnym co, stwierdzono na podstawie przeprowadzonego testu zgodności χ^2 ,
- dane wykorzystane do przeprowadzenia testów powtarzalności i odtwarzalności można opisać rozkładem normalnym, a ich wariancję są sobie równe, wniosek na

podstawie przeprowadzonego testu jednorodności wielu wariancji w przypadku powtarzalności i odtwarzalności wyników pomiarowych ($\chi^2 < \chi_{\alpha}^2$),

- potwierdzenie rozkładu normalnego i równości wariancji pozwalały przeprowadzić test analizy wariancji dla wielu średnich w celu określenia powtarzalności i odtwarzalności wyników eksperymentalnych,
- wszystkie średnie z wyników pomiarów prądów depolaryzacji są sobie równe oraz w wybranym parametrze pomiarowym zachodzi powtarzalność i odtwarzalność wyników eksperymentalnych z 5%-wą tolerancją błędów ($F < F_{\alpha}$).

Ze względu na całkowitą losowość doboru typu próbki oraz parametrów pomiaru wykonana analiza statystyczna dowodzi, że w przypadku pozostałych badanych próbek izolacji aramidowo-olejowej występuje także powtarzalność i odtwarzalność wyników pomiarowych.

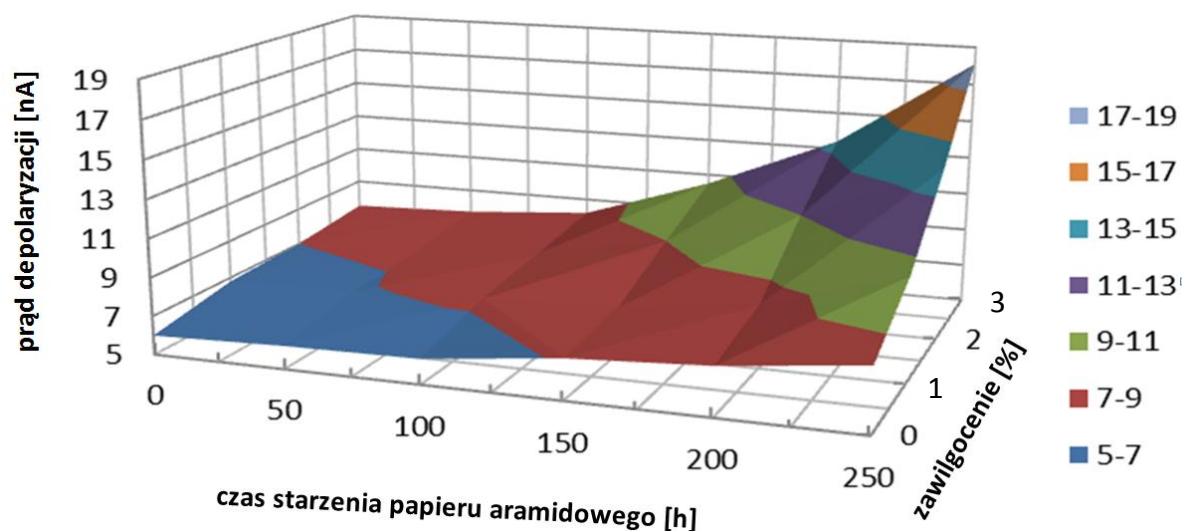
11. Wnioski końcowe

Wprowadzenie izolacji wykonanej z papieru aramidowego jako izolacji stałej do transformatorów zanurzeniowych jak i suchych, wydaje się być jednym z przełomowych kroków w zakresie modernizacji transformatorów energetycznych dużych mocy. Bardzo dobre właściwości elektryczne oraz mechaniczne w połączeniu z bardzo wysoką odpornością temperaturową materiału oraz odpornością na różnego rodzaju związki chemiczne występujące w otoczeniu transformatorów, w tym będące jego produktami ubocznymi, wpływają na wciąż rosnące zainteresowanie producentów i użytkowników na transformatory stosujące produkty z grupy aramidów. Powstający nowy trend do stosowania tego rodzaju izolacji stałej, pociąga za sobą konieczność opracowania wiarygodnych metod diagnostycznych pozwalających bezpiecznie i długotrwałe eksploatowanie tych niezwykle drogiej oraz pełniących kluczową rolę jednostek sieci energetycznych.

Przeprowadzone badania wykazały, że zaprezentowana i szczegółowo opisana metoda przyspieszonego kontrolowanego procesu starzenia izolacji wykonanej z papieru aramidowego Nomex® serii 400, polegająca na wygrzewaniu izolacji przez odpowiednio długi czas w temperaturze 250°C, ma kluczowy wpływ na podstawowe parametry elektryczne i mechaniczne badanego materiału. Ponadto wpływ ten jest także widoczny - poprzez zmiany zachodzące w strukturze materiału, które można było zaobserwować na zdjęciach wykonanych w odpowiednim powiększeniu. Opracowanie metodologii przygotowania typoszeregów próbek o zróżnicowanym stopniu zesterzenia i zawilgocenia izolacji umożliwiło, przeprowadzenie testów sprawdzających przydatność metody PDC do diagnostyki transformatorów dużych mocy wykorzystujących tego rodzaju izolację stałą. Tym samym stwierdzić można, że jedna z tez pracy, tzn. cyt. „Możliwe jest preparowanie próbek izolacji aramidowej o określonej wytrzymałości mechanicznej, poprzez zastosowanie odpowiedniej obróbki termicznej.”, znalazła swoje eksperymentalne udowodnienie.

Przeprowadzone badania wykazały, że stosując metodę PDC polegającą na pomiarze prądu depolaryzacji, obserwujemy dużą jego zależność od podstawowych parametrów determinujących stan izolacji stałej, czyli zesterzenia oraz jej zawilgocenia. Choć w przypadku izolacji aramidowej problem jej zawilgocenia nie jest tak newralgiczny jak w przypadku tradycyjnej izolacji wykonanej z papieru celulozowego, to jednakże musi być uwzględniony ze względu na procesy zachodzące na wskutek zmian jej wartości.

Zaprezentowany na rysunku 11.1 wykres przedstawia wpływ zarówno zestarzenia jak i zawilgocenia izolacji wykonanej z papieru aramidowego dla przykładowej próbki impregnowanej olejem mineralnym na wartość prądu depolaryzacji.



Rys. 11.1. Wpływ zawilgocenia oraz zestarzenia papieru aramidowego impregnowanego olejem mineralnym Nytro 10GBN na prąd depolaryzacji w temperaturze 50°C i czasie depolaryzacji równym 250 s

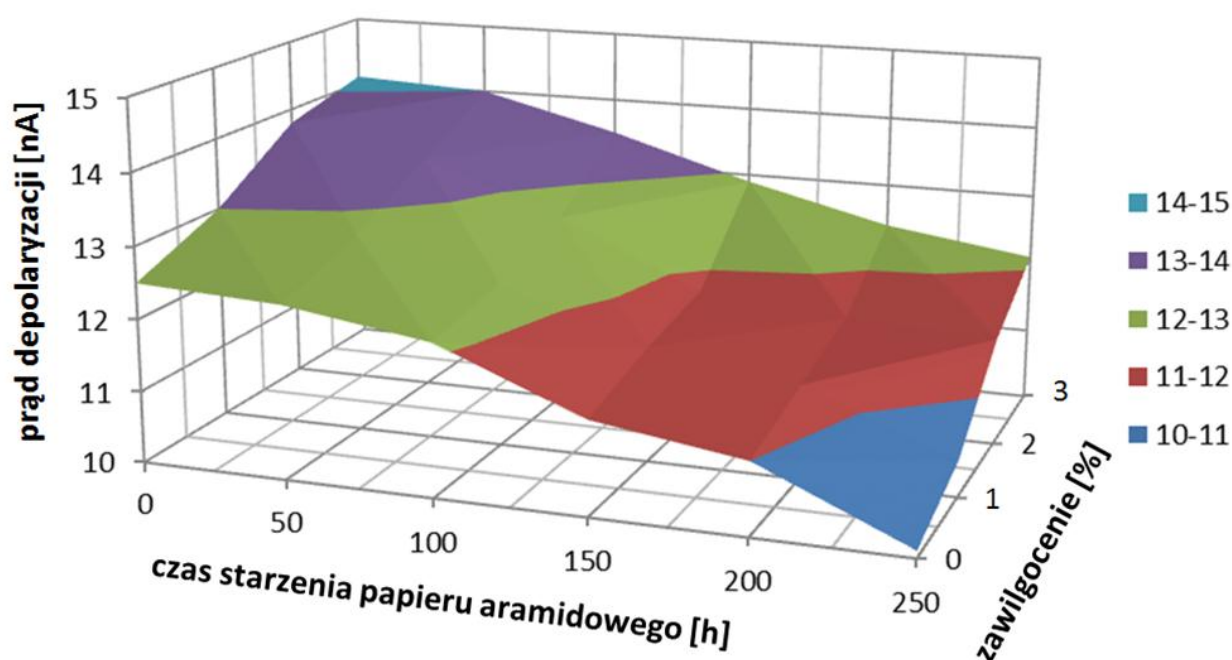
Po przeprowadzonych badaniach można stwierdzić, że adaptacja metody PDC w diagnostyce stanu izolacji transformatorów dużych mocy jest w pełni możliwa szczególnie w przypadku izolacji aramid-olej mineralny, dla której trendy zmian wartości prądu depolaryzacji są bardzo dobrze widoczne oraz w pełni powtarzalne. Analizując wszystkie czasowe charakterystyki prądu depolaryzacji próbek izolacji wykonanej z papieru aramidowego Nomex[®] 400 impregnowanego mineralnym olejem izolacyjnym Nytro 10GBN stwierdzono:

- wzrost temperatury izolacji wywołuje mierzalny, stały i przewidywalny wzrost wartości prądu depolaryzacji w całym analizowanym oknie czasowym;
- wzrost stopnia zawilgocenia izolacji wywołuje mierzalny i przewidywalny wzrost wartości prądu depolaryzacji w całym analizowanym oknie czasowym, przy uwzględnieniu oddziaływania temperatury;

- wzrost stopnia zesterzenia izolacji wywołuje mierzalny i przewidywalny wzrost wartości prądu depolaryzacji w całym analizowanym oknie czasowym, przy uwzględnieniu oddziaływania stopnia zawilgocenia i temperatury.

Uwzględniając specyfikę eksploatacji izolacji aramidowo-olejowej w pracującym hermetycznym transformatorze energetycznym stwierdzić można, że kolejna z tez pracy, tzn. cyt.: „Wykorzystując metodę PDC (Polaryzation and Depolarization Current) oraz analizę aproksymacyjną czasowych charakterystyk prądu depolaryzacji, możliwe jest szacowanie stopnia zawilgocenia próbki izolacji aramidowej, niezależnie od stopnia jej zesterzenia oraz temperatury.”, znalazła swoje eksperymentalne udowodnienie.

Zastosowanie metody PDC dla układów wykorzystujących izolację aramid-ester syntetyczny Midel 7131 jest także możliwe, jednakże zmiany stopnia zesterzenia oraz zawilgocenia izolacji pociągają za sobą znacznie mniejsze różnice w wartościach prądów depolaryzacji, co powoduje konieczność stosowania znacznie dokładniejszych metod pomiarowych oraz większą wrażliwość na czynniki zewnętrzne.



Rys. 11.2. Wpływ zawilgocenia oraz zesterzenia papieru aramidowego impregnowanego Estrem syntetycznym Midel 7131 na prąd depolaryzacji w temperaturze 40°C i czasie depolaryzacji równym 220 s

Rysunek 11.2 przedstawia wpływ stopnia zesterzenia oraz zawilgocenia izolacji wykonanej z papieru aramidowego dla przykładowej próbki impregnowanej estrem syntetycznym na wartość prądu depolaryzacji. Analizując wszystkie czasowe charakterystyki prądu depolaryzacji próbek izolacji wykonanej z papieru aramidowego Nomex® 400 impregnowanego estrem syntetycznym Midel 7131 stwierdzono:

- wzrost temperatury izolacji wywołuje mierzalny, stały przewidywalny wzrost wartości prądu depolaryzacji w całym analizowanym oknie czasowym;
- wzrost stopnia zawilgocenia izolacji wywołuje mierzalny i przewidywalny wzrost wartości prądu depolaryzacji w całym analizowanym oknie czasowym, przy uwzględnieniu oddziaływań temperatury;
- wzrost stopnia zesterzenia izolacji wywołuje trudne w jednoznacznej interpretacji zmiany w wartościach prądu depolaryzacji (mieszczące się w granicach błędu pomiarowego) w całym analizowanym oknie czasowym.

Podobnie w przypadku impregnacji olejem mineralnym, również dla estru syntetycznego stwierdzić można, że w zakresie opisanym przez drugą tezę pracy, udowodniono na drodze eksperymentu jej prawdziwość.

Przeprowadzona w rozdziale 10 pracy analiza statystyczna dowiodła powtarzalność oraz odtwarzalność prezentowanych wyników eksperymentów z 5% tolerancją popełnienia błędu.

12. Problemy otwarte

Przeprowadzone badania eksperymentalne dostarczyły obiecujących wyników warunkujących możliwość zastosowania metody PDC do diagnostyki stanu izolacji transformatorów energetycznych, szczególnie w połączeniu aramid-olej mineralny. Jednakże pozostaje jeszcze kilka problemów otwartych wymagających przeprowadzenia dodatkowych badań.

Badania przeprowadzone zostały na bazie przygotowanych próbek izolacji z papieru aramidowego Nomex® 400. Podobne badania należy wykonać na rzeczywistych jednostkach transformatorowych w celu porównania otrzymanych wyników, które mogłyby w pełni potwierdzić przydatność opisaną metodę. Zasadnym byłoby uzupełnienie badań metodą PDC o układy izolacyjne oparte na innych typach płynów izolacyjnych transformatorów energetycznych.

Kluczowym wydaje się wykonywanie tzw. fingerprint'u, eksploatowanych oraz nowych transformatorów energetycznych zawierających omawiany rodzaj izolacji. Skatalogowanie tego rodzaju informacji pod względem różnorodności typów badanych jednostek oraz pod względem czasu i rodzaju ich eksploatacji. Umożliwiłoby stworzenie algorytmu pozwalającego określić stopień degradacji izolacji stałej wykonanej z aramidu.

W celu zwiększenia prawdopodobieństwa otrzymania prawidłowych wyników oceny stanu izolacji aramidowej transformatorów należy badania wzbogacić o dodatkową metodę pomiarową. Na podstawie danych ze źródeł literaturowych, w ramach uzupełnienia zaleca się zastosowanie metody RVM (Recovery Voltage Method) [96].

13. Literatura

- [1] Aksamit P., Zmarzły D.: Zmiany starzeniowe mineralnego oleju izolacyjnego domieszkowanego fulerenami C60. PAR 12/2010, s. 130-133.
- [2] Alff J. J., Houhanessian V. D., Zaengl W. S., Kachler A. J.: A Novel, Compact Instrument for the Measurement and Evaluation of Polarisation/Depolarisation Currents Conceived for On-Site Diagnosis of Electric Power Apparatus, Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation USA, 2000, s. 161-167.
- [3] Baker-Jarvis J.A.: Generalized Dielectric Polarization Evolution Equation, IEEE Trans. on -trics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 3 (2000), s. 374–386.
- [4] Bednarska B., Buchacz T., Zieliński W.: Płyny syntetyczne stosowane w transformatorach. Referat ZPBE Energopomiar-Elektryka, Gliwice 2006.
- [5] Bhatia A.: Aramid papers with improved dimensional stability. Electrical Electronics Insulation Conference, Rosemont, Illinois, USA, 409-410, September 1995.
- [6] Blenow J. and all.: Field Experiences With Measurement of Dielectric Response in Frequency Domain for Power Transformers Diagnostics, IEEE Trans. Pow. Deliv., vol.21, 2006, s. 681-688.
- [7] 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.1,2004, s. 192-196.
- [8] Boczar T., Wolny S.: Współzależność napięcia generacji wyładowań niezupełnych i deskryptorów charakteryzujących impulsy emisji akustycznej, Konferencja Naukowo-Techniczna Transformatory w Eksploatacji, Sieniawa 23-25 kwietnia 2003, s. 167-176.
- [9] Böttcher C., Brodewijk P.: Theory of Electric Polarization: Steady-state fields, tom 1. Elsevier Press, 1973.
- [10] Böttcher C., Brodewijk P.: Theory of Electric Polarization: Time-dependent fields, tom 2. Elsevier Press, 1978.
- [11] Breitenbauch B., Kuchler A., Leibfreid T., Zaengl W. S.: Insulation Diagnosis by Polarization and Depolarization Current Measurements, 13th International Symposium of High Voltage Engineering, Delf, Netherlands, 23-27 August 2003.
- [12] Buchacz J., Szymański Z., Warczyński P.: Wybrane metody diagnostyki stanu technicznego izolatorów przepustowych z izolacją papierowo-olejową. Materiały konferencyjne: Zarządzanie Eksploatacją Transformatorów. Wisła-Jawornik 2010, s. 143-156.
- [13] Celiński Z.: Materiałoznawstwo elektrotechniczne, Ofic. Wyd. Politechniki Warszawskiej 2011.

- [14] Chang J. S., Kelly A.J., Crowley J.M. et al., Handbook of Electrostatic Processes, Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong, 1995.
- [15] Chełkowski A.: Fizyka dielektryków. PWN, Warszawa, 1993.
- [16] CIGRE Working Group A2.35: Experiences in service with new insulating liquids, CIGRE Brochure, No 436, October 2010.
- [17] Csèpes 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, 1998, s. 345-355.
- [18] Dai J., Wang Z. D.: A comparison of the impregnation of cellulose insulation by ester and mineral oli, IEEE Trans. Dielectr. Insul., 15 (2008), n.2, s. 1582-1594.
- [19] Das-Gupta D. K.:Conduction Mechanisms and High-Field Effects in Synthetic Insulating Polymers, IEEE Trans Electr. Insul., Vol. 4 (1997), s. 149–156.
- [20] David E., Lamarre L.: Low-Freqency Dielectric Response of Epoxy-Mica Insulated on Dielectric and Electrical Insulation, vol. 14, no. 1,February 2007, s. 212-226.
- [21] Dąbrowski J. R.: Ocena ekologiczna cieczy eksploatacyjnych. Paliwa, oleje i smary w eksploatacji, nr 15, wrzesień 1994.
- [22] Dirana, Dielectric Response Analysis and Moisture in Oil-Paper Dielectrics, instrukcja obsługi firma Omicron.
- [23] Dombek G., Nadolny Z., Przybyłek P.: Porównanie estrów naturalnych i olejów mineralnych w aspekcie wykorzystania w transformatorach energetycznych wysokich napięć, Politechnika Poznańska, Electrical Engineering, No74, 2013, s. 151-158.
- [24] Duart J.C., Szewczyk R.: Materials & New Technology - With a Special Focus on the Design of Transformers with Alternative Solid and Liquid Insulation Materials, Advanced Research Workshop on Transformers, Baiona 2013.
- [25] Ekanayake C, Graczykowska A., Walczak K., Gubański S.: Dielectric Spectroscopy Measurements on Oil Impregnated Paper/Pressboard Samples, II International Conference APTADM'2004, Wrocław, Poland, 15-17 September 2004.
- [26] Fleszyński J.: Badania mechanizmu przebicia elektrycznego cieczy izolacyjnych, ZN Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1986.
- [27] Flisowski Z.: Technika wysokich napięć, WNT, Warszawa 1988.
- [28] Franchek M.A., Prevorst T. A.: Conductor Insulation Tests in Oil Aramid Vs. Kraft. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 5,2002, s. 10-14.
- [29] Frącz P.: Założenia systemu eksperckiego pomiaru wyładowań niezupełnych przy zastosowaniu metody spektrofotometrii optycznej, PAK vol. 55, nr 1/2009, s. 50-53.
- [30] Fröhlich H.: Theory of Dielectrics. Oxford University Press, Oxford, 1958.

- [31] Gacek Z.: Wysokonapięciowa technika izolacyjna, Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 1996.
- [32] Gafvert U., Adeen L., Tapper M., Ghasemi P., Jonsson B.: Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Applied to Diagnostic of Power Transformers, 6th International Conference Properties and Applications of Dielectric Materials, vol. 2, 2000, s. 825-830.
- [33] Gielniak J., Graczkowski A., Walczak K., Morańda H., Szymański J., Bródka B., 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 Elektrotechnice, Jamrozowa Polana, 20-22 września 2006, s. 73-76.
- [34] Girgis R., Bernesjo M., Frimpong G. K.: Detailed performance of a 50 MVA transformer filled with a natural ester fluid versus mineral oil, CIGRE Session 2010, Paris 2010.
- [35] Glinka T.: Wpływ warunków eksploatacji na niezawodną pracę transformatora blokowego. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” BOBRME Nr 94, Katowice 2012, s. 131-137.
- [36] Gockenbach E., Borsi H.: Performance and new application of ester liquids, Inst. Of Electr. Power, Hanover Univ., Germany 2002.
- [37] Greń J.: Statystyka matematyczna, modele i zadania. PWN, Warszawa 1978.
- [38] Gubanski S. M., Blennow J., Karlsson I., Feser K., Tenbohlen S., Neumann C., Mościcka-Grzesiak H., Filipowski A., Tatarski L.: Reliable Diagnostics of HV Transformer Insulation for Safety Assurance of Power Transmission System REDIA- TOOL – a European Research Project, CIGRE, no. D1-207, Paris, France, 27 August – 1 September 2006.
- [39] Hassig M., Braunlich R., Gysi R., Alff J. J., Houhanessian V. D., Zaengl W. S.: On-site application of Advance Diagnosis Methods for Quality Assessment of Insulation of Power Transformers, IEEE Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena USA, 2001, s. 441-447.
- [40] Havrilak S., Jr. Havrilak S. J.: Dielectric and Mechanical Relaxation in Solids. Hanser Publishers, New York 1997.
- [41] Hilczer B., Małecki J.: Elektrety i piezopolimery, PWN, Warszawa 1992.
- [42] Hill R., Alison J.: Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering, Vol 5, rozdział Dielectric Polarization, Wiley, 1997, s. 315–332.
- [43] IEEE Working Group Report :Background Information on High Temperature Insulation for Liquid-Immersed Power Transformers,” IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994, s. 1892-1906.
- [44] Iorga C., Compartmental analysis of dielectric absorption in capacitors, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 2 (2000), s. 187–192.
- [45] Isard J.: High field conduction in ionic gases – effect of distribution of activation energies. Journal of Non-Crystalline Solids, Elsevier, 1996, s. 137–144.

- [46] Jackowicz-Korczynski A.: Analiza procesów polaryzacyjnych w polimerowych układach izolacyjnych wysokiego napięcia dla celów diagnostyki wysokonapięciowej, Rozprawa doktorska, AGH Kraków 2003.
- [47] Jonscher A. K.: Dielectric Relaxation in Solids. Chelsea Dielectric Press, 1983.
- [48] Jonscher A. K.: Universal Relaxation Law. Chelsea Dielectric Press, 1996.
- [49] 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, April 1999, s. 145-151.
- [50] Kao K.C.: Electrical Conduction and Breakdown in Insulating Polymers, Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Xi'an, China, 2000, s. 1-17.
- [51] Kapinos J.: Uszkodzenia eksploatacyjne transformatorów energetycznych. XLVI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych, 'SME' 2010, Gliwice-Ustroń 21-24.06.2010, Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” BOBRME Nr 88, Katowice 2010, s. 201-207.
- [52] Kapinos J.: Zagrożenia eksploatacyjne transformatora energetycznego spowodowane uszkodzeniem przepustu izolatorowego. Zeszyty Problemowe „Maszyny Elektryczne” BOBRME Nr 96, Katowice 2012, s. 139-145.
- [53] Kędzia J.,: Wykorzystanie pomiaru stopnia polimeryzacji celulozy do oceny stopnia zesterzenia papieru elektroizolacyjnego przy suszeniu udarowym. Przegląd Papierniczy, 1971, s. 162-165.
- [54] Kędzia J.: Zagrożenia izolacji transformatorów energetycznych wywołane elektryzacją statyczną, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 1999.
- [55] Klonecki W.: Statystyka dla inżynierów, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1999.
- [56] Küchler A., Leibfried T., Breitenbach B., Alff J. J., Houhanessian V., Zaengl W. S.:Transformer Insulation Diagnosis by Polarization and Depolarization Current Analysis, 48 InternationalesWissenschaftliches Kolloquium, Technische Universität Ilmenau, 22-25 September 2003.
- [57] Leibfried T., Kachler A.J.: Insulation Diagnostics on Power Transformers Using the Polarisation and Depolarisation Current PDC Analysis. IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul., USA 2002, s. 170-173.
- [58] Lepich M.: Accelerated Aging of Aramid Paper, Elektryka z 69 nr 350/2013 Politechnika Opolska nr s. 53-54.
- [59] Lepich M.: Analiza charakterystyk czasowych prądu depolaryzacji próbek izolacji aramidowo-olejowej pod kątem oceny wpływu stopnia ich zesterzenia, Electrical Engineering 78, Politechnika Poznańska 2014, s. 121-128.

- [60] Lepich M.: Analysis of time characteristics of depolarization current of samples aramid-synthetic ester Midel insulation in terms of impact moisture assesment, *Elektryka* z 70 nr 352/2014 Politechnika Opolska, s. 57-59.
- [61] Lepich M.: Influence of ageing degree of aramid-esterinsulation on depolarisation current, *Elektryka* z 71 nr 355/2015 Politechnika Opolska s. 45-46.
- [62] Lepich M.: Moisture Assessment for Power Transformers with Aramid Paper Insulation Using PDC, *Elektryka* z 68 nr 347/2012 Politechnika Opolska , s. 39-40.
- [63] Lepich M.: Wykorzystanie papieru aramidowego jako izolacji w transformatorach dużych mocy, *Prace doktorantów Politechnika Opolska* listopad 2012, s. 41-45.
- [64] Li J., Grzybowski S., Sun Y., Chen X.: Dielectric properties of rapeseed oil paper insulation, *IEEE Annual Report Conf. on Electr. Insul. And Die. Phenom.*, (2007), s. 500-503.
- [65] Lisowski M.: Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2004.
- [66] Maison A.: Opór właściwy skośny materiałów elektroizolacyjnych stałych w ujęciu normalizacji międzynarodowej, krajowej i zagranicznej, *Polimery – tworzywa wielocząsteczkowe*, 1971, nr 5, s. 214–218.
- [67] Malewski R., Ferrari S., Duart J.C.: Aramidowa i mieszana izolacja zwiększa obciążalność transformatorów, VII Sympozjum „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia”, Zakopane 21-23 października 1999.
- [68] Materiały instruktarzowe firmy Energo-Complex.
- [69] McNutt W.J., Provost R.L., Whearty R.J.: Thermal life evaluation of high temterature insulation system and hybrid insulation system in mineral oil , *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, July 1966, s. 1391-1399.
- [70] Michalczuk M., Subocz J.: Izotermiczny prąd relaksacji w laminatach szkło-epoksydowych. *Materiały III Sympozjum „Inżynieria Wysokich Napięć”*, IW-96, 1996, s. 69–75.
- [71] Midel 7131 Transformer Fluid – Technical Data Sheets.
- [72] Moreau E., Paillat T., Touchard G.: Flow Electrification in High Power Transformers: BTA Effect on Pressboard Degraded by Electrical Discharges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* vol. 10, 2003, s. 15–21.
- [73] O’Dwyer J.J.: The theory of electrical conduction and breakdown in solid dielectrics, Clarendon Press, Oxford, 1973.
- [74] 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, March/April 2006, s. 5-14.

- [75] Partyka J., Gajek M., Gasek K., Lis J.: Wpływ uziarnienia tlenku glinu na właściwości mechaniczne i mikrostrukturę tworzywa porcelanowego typu 130, *Materiały ceramiczne*, PTC, 2013, s. 283-289.
- [76] Perrier C., Ryadi M., Bertrand Y., Tran Duy C.: Comparison between mineral and ester oils, CIGRE Session 2010, Paris, 2010.
- [77] PN-ENIEC 60296:2005, Płyny do zastosowań elektrotechnicznych-Świeże mineralne oleje izolacyjne do transformatorów i aparatury łączeniowej.
- [78] Pukel G. J., Schwarz R., Schatzl F., Baumann F., Gerstl A.: Environmental friendly insulating liquids –a challenge for power transformers, CIGRE 6th Southern Africa Regional Conference, Cape Town, August 2009.
- [79] Raju R.R.G.: Conduction and thermally stimulated discharge currents in aramid paper. *Electrical Insulation IEEE Transactions on*, luty 1992, s. 162-173.
- [80] Rózga P., Skowron A.: Wpływ skoncentrowanego strumienia cieplnego na właściwości estrów syntetycznych, *Wiadomości Elektrotechniczne*, 2013, nr.2, s. 30-34.
- [81] Rózga P.: Wytrzymałość elektryczna transformatorowych płynów izolacyjnych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych, *Przegląd Elektrotechniczny* 1/2014, s. 245-247.
- [82] Rudnick L. R.: *Synthetics, Mineral Oils, and Bio-based Lubricants: Chemistry and Technology, Fluids*: CRC Press, 2006.
- [83] Rutkowski J.: *Podstawy inżynierii materiałowej – laboratorium*, Ofic. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
- [84] Saha T. K., Purkait P.: Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 11, Feb- 2004, s. 144 - 154.
- [85] Saha T. K., Purkait P.: Some Precautions for the Field Users of PDC Measurement for Transformer Insulation Condition Assessment, In: *IEEE*, zv. 3, 2003, s. 2371-2376.
- [86] Saha T. K.: Review of Polarisation Measurement for Assessing Insulation in Aged Transformers, *Australians Universities Power Engineering Conference*, Perth, Australia, 23-26 September 2001, s. 537-542.
- [87] Saha T. K., Pradhan, M., K., Yew, J., H.: Optimal Time Selection for the Polarisation and Depolarisation Current Measurement for Power Transformer Insulation Diagnosis, In: *IEEE*, zv.7, 2007, s. 1-7.
- [88] Saha T. K., Darvenitza M., Hill D.J.T., Lee T.T.: Electrical and Chemical Diagnostics of Transformers Insulation Part A: Aged Transformer Samples. *IEEE Power Engineering Society, Winter meeting* 1997.
- [89] Saha T. K.: Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers, *Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE vol. 10, no. 5, 2003, s. 903-917.

- [90] Siciński Z.: Badanie materiałów elektroizolacyjnych, WNT, Warszawa, 1968.
- [91] Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych, Oficyna wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie, z. 99, Opole 1998.
- [92] Skubis J.: Wybrane zagadnienia z techniki i diagnostyki wysokonapięciowej, Oficyna wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 1998.
- [93] Stepina V., Vesely V.: Lubricants and special Fluids, Elsewer, Amsterdam 1992.
- [94] Subocz J.: Transformatory w eksploatacji, Wydawnictwo Energo-Complex, kwiecień 2007.
- [95] Subocz J.: Wybrane zagadnienia przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki izolacji kompozytowej, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Monografia nr 580, Szczecin 2003.
- [96] Szrot M., Subocz J.: Diagnostyka zawilgocenia transformatorów z zastosowaniem pomiaru „RVM+PDC”, PAK vol. 54, 11/2008, s. 777-779.
- [97] Tenbohlen S., Jovalekic M.: Water Saturation Limits and Moisture Equilibrium Curves of Alternative Insulation Systems. Cigre SC A2 & D1 Joint Colloquium 2011, Kyoto Japan.
- [98] Wang J., Haolong M.: Computation of streaming current in oil pipes. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation vol. 16, 2009, s. 299–304.
- [99] Wiklund P., Levin M., Pahlavanpour B.: Copper Dissolution and Metal Passivators in Insulating Oil. IEEE Electrical Insulation Magazine vol. 23, 2007, s. 6–14.
- [100] Wintle H. J.: Absorption Currents and Steady Currents in Polar Dielectrics, J. Non-Cryst. Solids, Vol. 15, (1974), s. 471–486.
- [101] Wintle H.J.: Charge Motion and Trapping in Insulators Surface and Bulk Effects, IEEE Trans Electr. Insul., Vol. 6, No. 1 (1999), s. 1–10.
- [102] Wolny S., Adamowicz A., Lepich M.: Influence of Temperature and Moisture Level in Paper-Oil Insulation on the Parameters of the Cole-Cole Model. IEEE Transaction on Power Delivery, vol 29, Feb.-2014, s. 246-250.
- [103] Wolny S., Lepich M., Adamowicz A.: Wpływ stopnia termicznej degradacji papieru aramidowego na jego właściwości mechaniczne i elektryczne, Prace instytutu elektrotechniki 261 IEL, 2012, s. 77-84.
- [104] Wolny S., Lepich M.: Analiza wpływu stopnia zawilgocenia oraz zesterzenia próbek izolacji aramidowo-olejowej na charakterystyki prądu depolaryzacji, PAK vol 60, nr 11/2014, s. 1006-1009.
- [105] Wolny S., Zdanowski M.: Analysis of Recovery Voltages Parameters of Paper-Oil Insulation Obtained from Simulation Investigations Using the Cole-Cole Model, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 16, Dec.- 2009, s. 1676-1680.

-
- [106] Wolny S.: Analiza i dobór parametrów układu z wirującą tarczą do pomiaru elektryzacji statycznej olejów izolacyjnych, Rozprawa doktorska Opole 2000.
- [107] Wolny S.: Diagnostyka stanu izolacji papierowo-olejowej z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych, Opole 2008 Politechnika Opolska.
- [108] Zdanowski M.: Streaming Electrification of Mineral Insulating Oil and Synthetic Ester MIDEI 7131. I IEEE Dielectrics and Electrical Insulation, June-2014, s. 1127-1132.
- [109] Zenker M.: Analiza relaksacji modelu kanału olejowego transformatora na podstawie pomiarów PDC, Energetyka, Zeszyt Tematyczny Nr XI, 2007, s. 9-13.
- [110] www.alf-engineering.ch
- [111] www.indiamart.com/biharinsulationhouse/insulation-papers.html#nomex-papers
- [112] www.nomexpaper.dupont.com
- [113] www.teijinaramid.com/aramids/what-is-aramid/