

**Stefan WOLNY, Marek LEPICH**

POLITECHNIKA OPOLSKA,  
Prószkowska 76 B-2, 45-758 Opole

## Analiza wpływu stopnia zawilgocenia oraz zestarzenia próbek izolacji aramidowo-olejowej na charakterystyki prądu depolaryzacji

**Dr hab. inż. Stefan WOLNY**

Urodzony w 1970 r. w Radomsku. W 2000 r. uzyskał stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie naukowej elektrotechnika. W roku 2010 uzyskał stopień doktora habilitowanego nauk technicznych w dyscyplinie naukowej elektrotechnika w specjalności materiałoznawstwo elektryczne. Profesor nadzwyczajny Politechniki Opolskiej Wydziału Elektrotechniki Automatyki i Informatyki.



e-mail: s.wolny@po.opole.pl

**Mgr inż. Marek LEPICH**

Urodzony w 1977 r. w Krapkowicach. W 2002 r. ukończył studia magisterskie na Politechnice Opolskiej na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Informatyki.



e-mail: marek.lepich@arcelormittal.com

### Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych wpływu zestarzenia i zawilgocenia izolacji aramidowo-olejowej na prąd depolaryzacji, z uwzględnieniem oddziaływania temperatury na podstawie bezinwazyjnej metody PDC (Polarization and Depolarization Current). Ponadto w celu wskazania przydatności zastosowanej metody do oszacowania powyższych wskaźników przedstawiono wyniki badań statystycznych odtwarzalności i powtarzalności wykonanych pomiarów.

**Słowa kluczowe:** transformatory mocy, ocena stopnia zawilgocenia, ocena stopnia starzenia, polaryzacja, izolacja aramidowo-olejowa.

### Impact analysis of the degree of moisture and aging samples aramid-oil insulation on the depolarization current characteristics

#### Abstract

Results of laboratory research into the influence of ageing and moistness degree of aramid-oil insulation samples on the depolarisation current considering temperature effects are presented. Also the possibilities to apply the non-invasive PDC (Polarisation and Depolarisation Current) diagnostic method to analyse depolarisation currents of the new type of synthetic insulation based on aramid are described. The method of preparation of samples, which differ – in a controlled manner – as to the moistness and ageing degree, is also described. Because of the resulting high repeatability and reproducibility of obtained measurements, this method seems to be appropriate for the diagnosis of solid insulation of power transformers.

**Keywords:** Power transformers, assess the degree of moisture, assess the degree of aging, polarization, oil-aramid insulation.

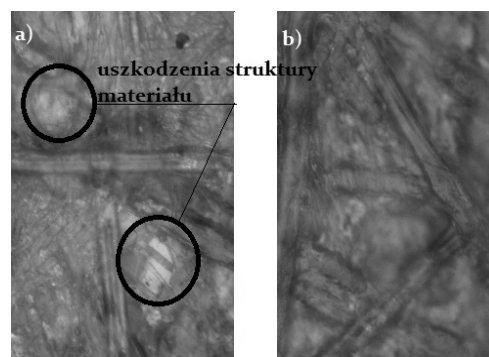
### 1. Wstęp

Obecna sytuacja ekonomiczno-gospodarcza na świecie wymusza na użytkowników sieci energetycznych podejmowanie kroków umożliwiających w dalszej perspektywie czasowej obniżenie kosztów eksploatacji oraz zapobieganiem awariom niosącym ryzyko dewastacji środowiska naturalnego. Jednym z kroków umożliwiających osiągnięcie powyższych celów jest konstruowanie urządzeń z trwalszych materiałów jak i prawidłowe ich eksploatawanie poprzez stałą kontrolę ich kondycji technicznej. Najbardziej awaryjnym urządzeniem sieci energetycznej są transformatory dużych mocy. Główną przyczyną awarii tego rodzaju transformatorów jest uszkodzenie izolacji stałej uzwojeń, które zazwyczaj wykonywana są na bazie celulozy. Zastosowanie aramid, w porównaniu do celulozy charakteryzuje się zdecydowanym zwiększeniem odporności na wysokie temperatury, co jest głównym czynnikiem wpływającym na przedwczesne starzenie izolacji stałej transformatorów. Kolejną zaletą eliminacji dotychczas szeroko stosowanej celulozy jest ograniczenie efektu powstawania

zawilgocenia w izolacji jako produktu ubocznego starzenia izolacji celulozowej [1]. Znaczny wzrost zastosowania aramid jako izolacji stałej uzwojeń transformatora pociąga za sobą konieczność opracowania wiarygodnej metody umożliwiającej szacowanie stopnia degradacji izolacji stałej wykonanej z aramid, przeprowadzanej w sposób nieinwazyjny. Jednym ze sposobów bezinwazyjnego szacowania stanu izolacji jest metoda PDC (Polarization and Depolarization Current) oparta przede wszystkim na analizie prądów depolaryzacji [2].

### 2. Przygotowanie próbek izolacji aramidowo-olejowej

Próbki wykorzystane do badań wykonano z papieru aramidowego Nomex® typu 410 o grubości 50 µm (rodzaj materiału najczęściej stosowany jako izolacja uzwojeń transformatorów dużych mocy wykorzystujących izolację aramidową). Do nasyceń próbek wykorzystano: świeży mineralny olej izolacyjny firmy Nynas typu Nytro 10GBN. Olej mineralny wciąż jest szeroko stosowanym środkiem jako syciwo ze względu na jego stosunkowo niską cenę oraz na ograniczony wpływ na np. zjawiska elektryzacji strumieniowej, jakie występują szczególnie intensywnie w układach aramid-estry syntetyczne [3]. Papier aramidowy przed impregnacją został poddany suszeniu w temperaturze 100°C pod próżnią przez okres 24 h (ustalenie szczytkowego zawilgocenia początkowego), przyspieszonemu starzeniu termicznemu (wygrzewanie w wysokiej temperaturze w otoczeniu powietrza atmosferycznego) i kontrolowanemu wagowo zawilgacaniu (migracja wody z atmosfery do papieru aż do ustalenia się określonego przyrostu wagi próbki).



Rys. 1. Widok próbek pod mikroskopem w skali 1:500  
a) Papier aramidowy zestarzony w temperaturze 250°C przez 250 h  
b) Papier aramidowy niezestarzony  
Fig. 1. View of samples under a microscope  
a) Aramid paper aged in temperature 250°C for 250 h  
b) Aramid paper not aged

Do wyznaczenia przyrostu zawilgocenia/wagi użyta została waga OX-200 firmy Fawag o dokładności  $\pm 0,0001$  [g]. Pomiar wagi próbek dokonywany był w pomieszczeniu o stałej wilgotności i ciśnieniu rejestrowanym przez stacje meteorologiczną. Uzyskano w ten sposób 20 próbek (dla obydwu rodzajów płynów izolacyjnych) o zróżnicowanym stopniu zesterzenia i zawilgocenia zgodnie z przedstawioną tabelą 1. Opisana metoda kontrolowanego wagowo zawilgacania próbek przed impregnacją olejem, uzyskała pozytywną weryfikację podczas wcześniejszych badań eksperymentalnych prowadzonych na próbkach z izolacją celulozowo-olejową [4, 5]. Zaproponowany sposób przyspieszonego starzenia termicznego aramidu oparto na obserwacji pod mikroskopem zmian strukturalnych zachodzących w kompozycji papieru, tzn. pęknięcie włókien oraz pojawianie się obszarów o budowie nieregularnej, wynikających ze zlepiania się uszkodzonych włókien aramidu (rysunek 1).

Próbki izolacji aramidowej wykonano w formie prostokątów o wymiarach 135 mm x 700 mm, nawiniętych w formie zwijki na elektrodę niskiego potencjału, oddzielonych elektrodą wysokiego potencjału. Oznaczenie kolejnych próbek przyjęto zgodnie z tab. 1. Uzyskane próbki umieszczane były kolejno w hermetycznym, metalowym, nierdzewnym naczyniu wypełnionym olejem mineralnym. Zamontowany zestaw grzałek wraz z kontrolerem PID umożliwiał regulację temperatury badanych próbek izolacji z dokładnością  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

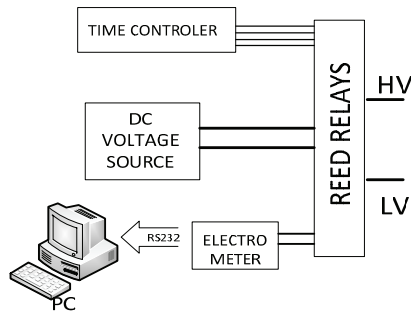
Tab. 1. Sposób oznaczania próbek izolacji aramidowo-olejowej  
Tab. 1. Method of marking samples of aramid-oil insulation

IA	IB	IC	ID
IIA	IIB	IIC	IID
IIIA	IIIB	IIIC	IIID
IIVA	IIVB	IIVC	IIVD
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 zestaryzony w temp 250°C przez 50 h  
 III- papier zestaryzony w temp. 250°C przez 100 h  
 IV- papier zestaryzony w temp. 250°C przez 150 h  
 V- papier zestaryzony w temp. 250°C przez 200 h  
 VI- papier zestaryzony w temp. 250°C przez 250 h

### 3. Układ pomiarowy

Układ pomiarowy w postaci schematu blokowego przedstawiono na rysunku 2. Jako źródło napięcia stałego wykorzystano miernik dużych rezystancji Megger BM25, który zasilano z żelowego akumulatora.

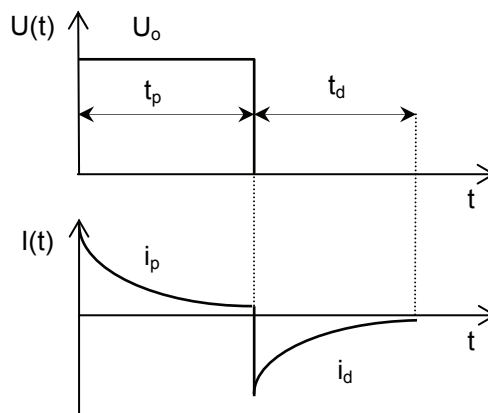


Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego  
Fig. 2. Block diagram of the measuring system

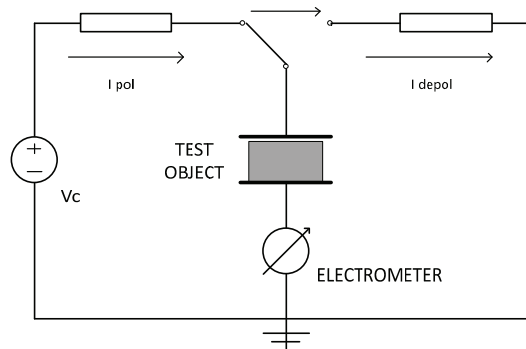
Procedurę pomiaru realizował dedykowany układ mikroprocesora, sterujący czasem załączenia i wyłączenia układu poprzez

wysokonapięciowe próżniowe przekaźniki kontaktronowe. Tor niskoprądowy składał się z elektrometru Keithley 6517A połączony z komputerem dla celów rejestracji i archiwizacji wyników badań.

Na podstawie badań wstępnych, całkowity czas pomiaru ustalono odpowiednio: 600 s polaryzacja oraz 600 s depolaryzacja. 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 600 s obserwowano jego zanikanie do wartości trudno mierzalnych. Wyniki pomiarów były archiwizowane z częstotliwością 5 Hz, natomiast napięcie ładowania  $U_c$  wynosiło 50 V. Proces polaryzacji i depolaryzacji przebiega zgodnie z rysunkiem 3. Po umieszczeniu rozładowanej izolacji w polu napięcia stałego wartość prądu zależy od stałej czasowej wynikającej z przewodności warstwy izolacyjnej oraz jest związana z aktywnością różnych procesów polaryzacji/depolaryzacji w danym 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 [7].



Rys. 3. Przebieg prądów i napięć występujące podczas cyklu pomiarowego PDC  
Fig. 3. Current and voltage waveforms during PDC measuring cycle

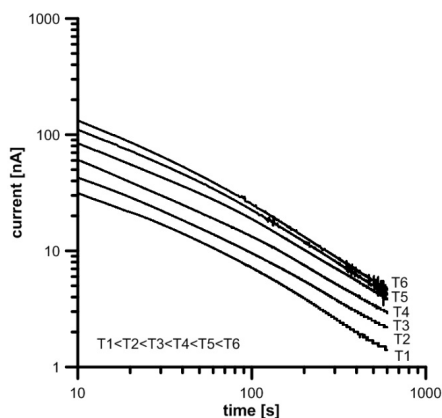


Rys. 4. Zasada działania układu pomiarowego  
Fig. 4. Measuring set up principle

### 4. Wyniki badań

Pomiary prądów depolaryzacji wykonano dla próbek o zróżnicowanym stopniu zesterzenia i zawilgocenia zgodnie z tabelą 1. Aby zniwelować błędy mogące powstać w związku ze zmienną temperaturą badanej izolacji, wszystkie testy dla poszczególnych próbek były realizowane w celu wypełnionej olejem o stabilizowanej temperaturze. Badania wykonywano w przedziale temperatur od  $20^\circ\text{C}$  do  $70^\circ\text{C}$ , ze zmianą o  $10^\circ\text{C}$  (zakres temperatur wystę-

pujących w eksploatowanych transformatorach energetycznych). Na rys. 5. przedstawiono zależność prądu depolaryzacji od temperatury dla przykładowej próbki aramid-olej mineralny. Wzrost temperatury izolacji aramidowo-olejowej pociąga za sobą wzrost wartości prądu depolaryzacji, niezależnie od stopnia jej zesterzenia czy zawilgocenia, co objawia się w postaci wydłużenia czasu zaniku prądu depolaryzacji. Wskazuje to na silną zależność przewodności badanej izolacji aramidowo-olejowej oraz na znaczną intensyfikację procesów polaryzacji w badanej izolacji aramidowo-olejowej skutkiem oddziaływania temperatury. Wniosek ten jest zgodny z tym, co obserwowane jest również w przypadku klasycznej izolacji celulozowo-olejowej.



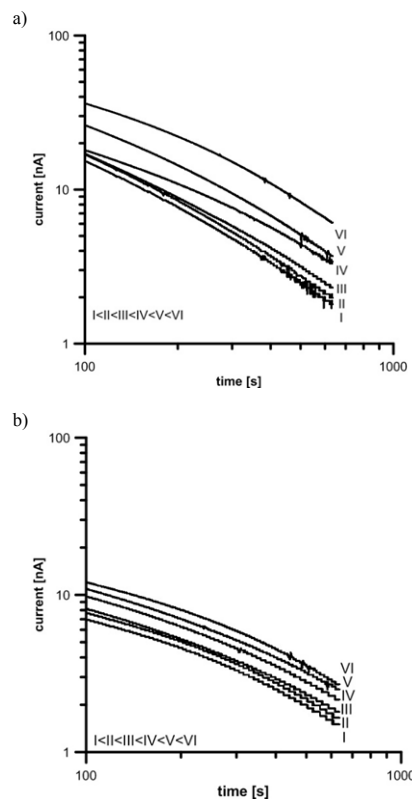
Rys. 5. Charakterystyki prądów depolaryzacji w funkcji czasu w zależności od temperatury badanej izolacji dla wybranej próbki VIC (tab. 1)

$T_1=20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2=30^{\circ}\text{C}$ ,  $T_3=40^{\circ}\text{C}$ ,  $T_4=50^{\circ}\text{C}$ ,  $T_5=60^{\circ}\text{C}$ ,  $T_6=70^{\circ}\text{C}$

Fig. 5. Charts of depolarisation current vs. time depending on the temperature of tested insulation for a chosen VIC sample (Tab. 1)

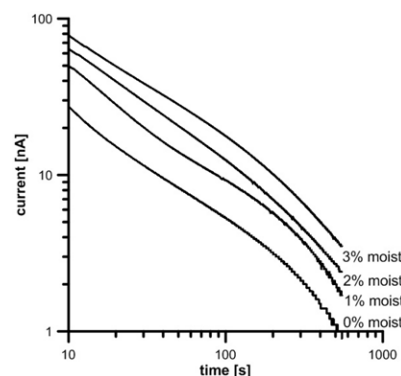
Rysunek 6 przedstawia wybrane przebiegi prądów depolaryzacji wyznaczone dla próbek aramidowo-olejowych różniących się stopniem zesterzenia. Analizując wpływ zesterzenia próbek zauważyć należy, że dla czasów powyżej 100 s obserwuje się wydłużanie zaniku prądu depolaryzacji wraz z rosnącym zesterzeniem, niezależnie od temperatury oraz stopnia zawilgocenia próbek. Zjawisko to zachodzi odwrotnie niż w przypadku starzonej izolacji celulozowej [6]. Odpowiada za to zapewne odmienny charakter procesów starzeniowych skutkiem oddziaływania podwyższonej temperatury w przypadku papieru aramidowego oraz celulozowego. Łańcuch makrocząsteczki celulozy na skutek oddziaływania temperatury, cząsteczek tlenu oraz wody rozpadają się, czego wynikiem jest rozszerzenie obserwowanego spektrum czasów relaksacji przy jednoczesnym obniżeniu ich maksimum. Daje to swe odzwierciedlenie w szybszym zanikaniu prądu depolaryzacji próbek izolacji celulozowo-olejowej o większym stopniu zesterzenia (degradacji termicznej celulozy). Włókna aramidowe papieru syntetycznego w wyniku oddziaływania przede wszystkim znacznie podwyższonej temperatury (w stosunku do papieru celulozowego) pękają odsłaniając swą strukturę wewnętrzną, a następnie zlepiają się tworząc większe, nieregularnej już budowy obszary. Prawdopodobnie wywołuje to efekt zwiększania maksimum procesów relaksacji dla takich struktur oraz odpowiednio wydłużanie także czasów ich relaksacji. W przypadku prądu depolaryzacji wzrost stopnia degradacji termicznej włókien aramidowych objawiałby się wydłużaniem czasu jego zaniku, tak jak na rysunku 6. Do analizy wykorzystano okno czasowe w przedziale od 100 s do 600 s ze względu na zbyt dynamiczne zmiany wartości prądu depolaryzacji w początkowym czasie pomiaru, a także aby wyeliminować wpływ własności samego mineralnego oleju izolacyjnego w tym okresie czasu [7]. W podobny sposób przedstawia się wpływ zawilgocenia izolacji z papieru aramidowego na wartość prądów depolaryzacji przedstawiony dla przykładowej próbki na rysunku 7. Cząsteczki wody na skutek oddziaływania sił adhezji przylegają do powierzchni włókien aramidowych oraz mogą być również absorbowane do wewnętrznej struktury włókna w przypadku pęknięcia powierzchni wywołanego np. oddziaływaniem

wysokiej temperatury. Cząsteczki wody ze względu na swoją dużą polarność wywołują wzrost maksimum procesów relaksacji w obserwowanym oknie czasu, co objawia się istotnym zwiększeniem wartości prądu depolaryzacji tak jak na rysunku 7.



Rys. 6. Charakterystyki prądów depolaryzacji w funkcji czasu dla zróżnicowanego zesterzenia i stałego zawilgocenia papieru aramidowego, a) izolacja aramidowa o zawilgoceniu 2% i temperaturze układu  $50^{\circ}\text{C}$ , b) izolacja aramidowa o zawilgoceniu 1% i temperaturze układu  $30^{\circ}\text{C}$

Fig. 6. Curves of depolarisation current vs. time of differentiated ageing and constant moistness of aramid paper, a) aramid insulation with 2% humidity and system temperature  $50^{\circ}\text{C}$ , b) aramid insulation with 1% humidity and system temperature  $30^{\circ}\text{C}$



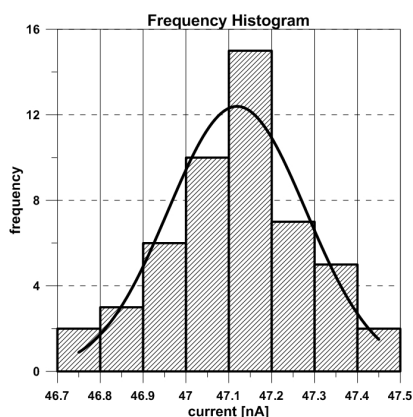
Rys. 7. Charakterystyki prądów depolaryzacji w funkcji czasu dla zróżnicowanego stopnia zawilgocenia i stałego poziomu zesterzenia papieru aramidowego 100 h oraz temperatury układu  $50^{\circ}\text{C}$

Fig. 7. Curves of depolarisation current vs. time of differentiated moisture content and constant ageing of aramid paper 100 h and system temperature  $50^{\circ}\text{C}$

## 5. Badania powtarzalności i odtwarzalności

W celu wykazania wiarygodności opisanej metody szacowania stanu izolacji aramidowej przeprowadzone zostały badania powtarzalności i odtwarzalności wyników w układzie pomiarowym, dla losowo dobranych próbek (seria IIIB zgodnie z tabelą 1). Badania powtarzalności zrealizowane zostały w oparciu o pomiar prądu depolaryzacji wykonany 10-krotnie przez pięć kolejnych dni.

Odtwarzalność została oszacowana poprzez badanie pięciu kolejnych próbek, pomiar prądu depolaryzacji wykonano 10-krotnie dla każdej próbki. Wnioski z wykonanych badań zostały wysunięte na podstawie parametrycznego testu istotności bazującego na analizie wariacji dla wielu średnich klasyfikacji pojedynczej [8]. Test został oparty o rozkład F Snedecora oraz założeniu, że danych jest k populacji o rozkładzie normalnym  $N(m_i, \sigma_i)$ . Określenie typu rozkładu danych zostało przeprowadzone w oparciu o nieparametryczny test istotności. W tym celu wykonano 50 pomiarów prądu depolaryzacji dla losowo dobranej próbki. Test zgodności chi-kwadrat dla przyjętego poziomu istotności  $\alpha=0,05$  wykazał nierówność, gdzie rozkład  $\chi^2$  obliczony z pomiarów ( $\sim 2,1$ ) jest znacznie niższy od rozkładu  $\chi^2_{\alpha}$  wyznaczonego z tabeli ( $\sim 14,1$ ), wskazując na rozkład wyników prądu depolaryzacji typu normalnego. Wyniki testu przedstawiono na rysunku 8. Spełnienie tego warunku pozwoliło na przeprowadzenie testu analizy wariacji dla wielu średnich. Obliczoną wartość rozkładu F oraz odczytaną z tabeli dla poziomu istotności  $\alpha=0,05$  przedstawia tabela 2. Ponieważ zachodzi nierówność  $F < F_{\alpha}$  przyjmujemy, iż wszystkie średnie wyniki pomiarów prądów depolaryzacji są sobie równe. Czyli w wybranym układzie pomiarowym zachodzi powtarzalność wyników eksperymentu z 5%-ową tolerancją błędów. Wynik testu dla powtarzalności oraz odtwarzalności przedstawiono na rysunku 9.



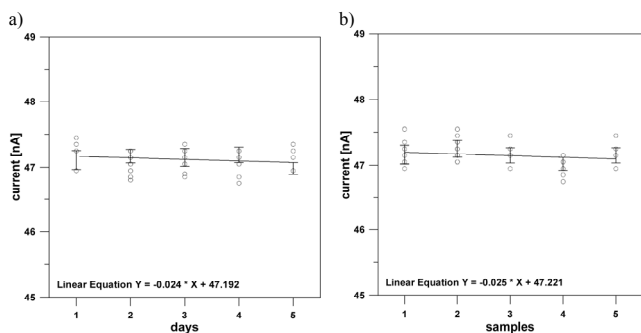
Rys. 8. Rozkład wyników prądów depolaryzacji

Fig. 8. Distribution of results of depolarization currents

Tab. 2. Obliczona i odczytana z tabeli rozkładu wartość F dla testu analizy wariacji wielu średnich

Tab. 2. Calculated and read from the distribution table value of the F test analysis of the variations of some medium-sized

	$\alpha$	n(stopnie swob.)	$F_{\alpha}$	F
powtarzalność	0,05	4	2,58	2,45
odtwarzalność	0,05	4	2,58	2,35



Rys. 9. Interpretacja wyników pomiarów a) powtarzalność, b) odtwarzalność

Fig. 9. Interpretation of measurement results a) repeatability, b) reproducibility

## 6. Wnioski

Na podstawie wykonanych pomiarów można stwierdzić, iż obserwacja i prawidłowa interpretacja uzyskanych pomiarów prądów depolaryzacji umożliwia oszacowanie stanu izolacji stałej transformatora wykonanej z aramidu w połączeniu z olejem mineralnym. Rokuje to pozytywnie co do możliwości zaadoptowania metody PDC, która w szerokim zakresie może służyć do bezinwazyjnej diagnostyki transformatorów dużych mocy, a także transformatorów o specjalistycznym zastosowaniu. Zaletą tej metody jest stosunkowo niski koszt i prostota przeprowadzania pomiarów. Ponadto wiele profesjonalnych mierników służących diagnostyce izolacji transformatorów, które również wykorzystują w swej analizie zjawisko polaryzacji w dielektrykach (np. metoda RVM [4] oraz metoda FDS [5]), umożliwia jednocześnie rejestrację charakterystyki czasowej prądu depolaryzacji. Jednakże pilną kwestią w tym zagadnieniu jest konieczność kontynuowania badań, szczególnie takich, które umożliwią porównanie i śledzenie zmian występujących w izolacji stałej eksploatowanego transformatora. Niestety w chwili obecnej tego typu jednostek jest stosunkowo niewiele, lecz niewątpliwie populacja transformatorów z izolacją syntetyczną będzie z każdym rokiem rosła. Wydaje się być zasadne przypuszczenie, że tak jak w transformatorach z izolacją klasyczną (celuloza-olej mineralny) podstawowym zagrożeniem bezawaryjnej eksploatacji jest gromadząca się w celulozie woda, tak w transformatorach z izolacją syntetyczną podstawowym zagrożeniem będzie stopniowo narastający stopień zesterzenia włókien aramidu.

## 7. Literatura

- [1] Franchek M.A., Prevorst T.A.: Conductor Insulation Tests in Oil Aramid Vs. Kraft. IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 5, s. 10-14, 2002.
- [2] 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.
- [3] Zdanowski M.: Streaming Electrification of Mineral Insulating Oil and Synthetic Ester MIDEI 7131. DOI of paper 10.1109/TDEI.2014.004455.
- [4] 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, s. 1676-1680, December 2009.
- [5] 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, s. 246-250, February 2014.
- [6] Leibfried T., Kachler A.J.: Insulation Diagnostics on Power Transformers Using the Polarisation and Depolarisation Current PDC Analysis. IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul., USA, s. 170-173, 2002.
- [7] 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, s. 1-7, 2007.
- [8] Greń J.: Statystyka matematyczna, modele i zadania. PWN, Warszawa 1984.

otrzymano / received: 26.08.2014

przyjęto do druku / accepted: 01.10.2014

artykuł recenzowany / revised paper