

Grzegorz MALINOWSKI\*

## **WPLYW TEMPERATURY NA WYLADOWANIA NIEZUPELNE W UKLADZIE UWARSTWIONYM W OLEJU MINERALNYM ORAZ ESTRZE SYNTETYCZNYM**

Artykuł przedstawia wyniki badań wyładowań niezupełnych w układzie izolacyjnym papier-ester w odniesieniu do układu izolacyjnego papier-olej, dla trzech wartości temperatury (25°C, 30°C oraz 40°C). W publikacji przedstawiono obiekt badań, procedurę pomiarową oraz analizę wyników. Wyniki badań wskazują na korelację pomiędzy aktywnością wyładowań niezupełnych a temperaturą układu izolacyjnego. Ponadto, badania wskazują, że układ izolacyjny z estrem syntetycznym jest bardziej podatny na wyładowania niezupełne niż układ izolacyjny z olejem mineralnym.

**SŁOWA KLUCZOWE:** wyładowania niezupełne, ester syntetyczny, olej mineralny, układ izolacyjny papier-ester, układ izolacyjny papier-olej

### **1. WPROWADZENIE**

Jednym z najważniejszych elementów systemu elektroenergetycznego jest transformator. Jest on odpowiedzialny za przetwarzanie energii elektrycznej od elektrowni do odbiorcy. Najczęściej taka jednostka musi być w pełni operatywna przez 24 godziny na dobę [3].

Jednymi z największych zagrożeń dla transformatora jest wilgoć oraz wyładowania niezupełne. Z powodu wysokiego średniego wieku transformatorów stanowiących trzon systemu energetycznego w Polsce (35 lat), takie jednostki muszą być regularnie poddawane kontroli pod względem, między innymi, poziomu zawilgocenia izolacji stałej oraz intensywności i ładunku wyładowań niezupełnych.

W transformatorach wysokiego napięcia jako główne medium izolujące i chłodzące od ponad stu lat stosowany jest olej mineralny. Od kilkunastu lat widać powolną tendencję do stosowania w tym celu także estrów naturalnych i syntetycznych. Estrы mają wiele zalet (np. niemal pełną biodegradowalność i wyższą temperaturę zapłonu [5]) w porównaniu z olejem mineralnym.

---

\* Politechnika Poznańska.

Urządzenia wypełnione tymi cieczami mogą pracować w miejscach, w których występuje zagrożenie katastrofą ekologiczną (nadmorskie farmy wiatrowe), pożarem (kopalnie) oraz w dużych skupiskach ludzkich. Mimo swoich niekwestionowanych zalet, estry nie są pozbawione wad, takich jak np. niższe napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych.

Jak wykazano w [2, 6], dla układu izolacyjnego papier-olej widać tendencję do samowygazowania wyładowań niezupełnych w danym układzie izolacyjnym.

Niniejsze badania są częścią badań występowania zjawiska wyładowań niezupełnych w estrach naturalnych oraz syntetycznych w odniesieniu do oleju mineralnego. Wykonywane są one dla zakresu temperatury od 20°C do 120°C. Ich celem jest określenie tendencji w zachowaniu wyładowań niezupełnych w estrach naturalnych i syntetycznych, w odniesieniu do oleju mineralnego, co ma przełożenie na proces projektowania układu izolacyjnego transformatora.

Większość doniesień literaturowych z zakresu wyładowań niezupełnych w estrach odnosi się do temperatury pokojowej, podczas gdy transformator energetyczny pracuje w szerokim zakresie temperatury (od wartości poniżej 0°C, przy tzw. „zimnym starcie”, do ponad 100°C, przy przeciążaniu). Nioe prowadzono dotąd badań dla tego zakresu temperatury, co stanowi bezpośrednią motywację do podjęcia niniejszych badań.

## 2. STANOWISKO BADAWCZE

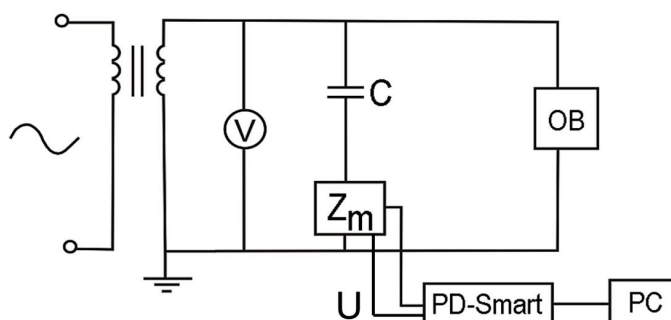
### 2.1. Układ pomiarowy i obiekt badań

Układ pomiarowy został wykonany zgodnie z [1]. Schemat układu został zaprezentowany na rysunku 1. W układzie tym wszystkie urządzenia pomiarowe były wolne od wyładowań niezupełnych własnych. Kondensator sprzęgający służył do wydzielenia sygnału wyładowań niezupełnych z sygnału napięciowego na obiekcie badań. Impulsy wnz (wyładowań niezupełnych), odkładające się na impedancji pomiarowej, były kierowane kablem optycznym do komputera z zainstalowanym oprogramowaniem do detekcji i rejestracji tych sygnałów. Do kalibracji napięcia probierczego został wykorzystany kilowoltomierz elektrostatyczny.

Obiekt badań został zaprojektowany tak, aby generował wyładowania ślizgowe [4] (rysunek 2). W szklanym, szczelnie zamkniętym pojemniku umieszczono dwie elektrody płaskie, o średnicy 27 mm oraz 67 mm, między którymi umieszczono płaską próbkę preszpanu, o wymiarach 40x40x2 mm. Półka ta była zaimpregnowanego badaną cieczą. Górna elektroda znajdowała się pod napięciem, natomiast dolna była uziemiona.

Próbka preszpanu została do badań przygotowana w następujący sposób: najpierw została wysuszona w próżni technicznej, do poziomu zawilgocenia

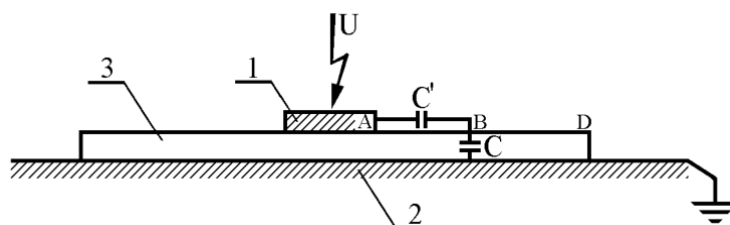
poniżej 1%, a następnie zaimpregnowana badaną cieczą izolacyjną (zawilgocenie cieczy: ester syntetyczny 132 ppm, olej mineralny 7 ppm).



Rys. 1. Schemat połączeń; V – kilowoltomierz elektrostatyczny, C – kondensator sprzęgający, Z<sub>m</sub> – impedancja pomiarowa, PD-Smart – miernik wyładowań niepełnych, OB – obiekt badań

Ponieważ przenikalność elektryczna zaimpregnowanego preszpanu jest wielokrotnie wyższa niż samej cieczy impregnującej, to pojemność C jest znacznie większa od pojemności C' (rysunek 2). W pokazanym układzie, na drodze A-D rozwijają się wyładowania niepełne o dużej intensywności (w postaci iskier ślizgowych) [4].

Wypalone przez iskry ślizgowe półprzewodzące ślady przegrzania powodują zmniejszenie wytrzymałości elektrycznej układu izolacyjnego, co może prowadzić do zwarcia [7].



Rys. 2. Układ do generowania wyładowań ślizgowych; 1, 2 – elektrody, 3 – próbka preszpanu [4]

Elektrody oraz próbka preszpanu zostały umieszczone w szczelnym, szklanym naczyniu wypełnionym badaną cieczą izolacyjną. Naczynie to zostało umieszczone w kąpielii olejowej. Mniejszy pojemnik miał wymiary 250x250x250 mm, natomiast większy 500x500x300 mm. Wewnątrz większego pojemnika umieszczono dwie grzałki, o mocy 1 kW każda. W mniejszym pojemniku, poza elektrodami znajdowała się sonda PT-100 do pomiaru temperatury. Dzięki tej sondzie można było regulować proces podgrzewania obiektu badań do żądanej temperatury z dokładnością  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

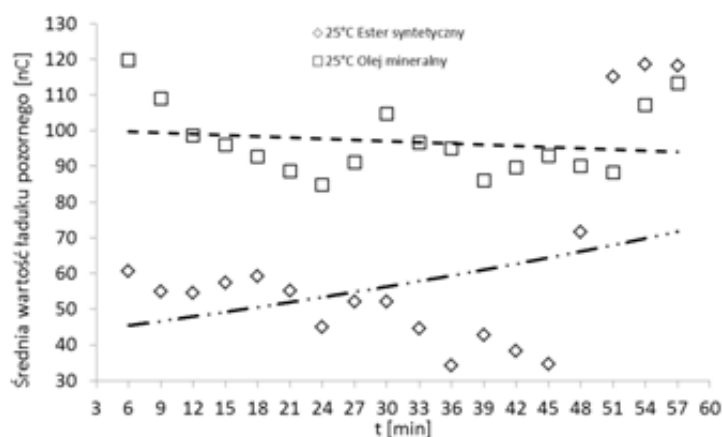
## 2.2. Procedura pomiarowa

Napięcie podnoszono od 0 V, z prędkością ok. 500 V/s, do wartości przy której ładunek rejestrowanych wyładowań niepełnych osiągnął wartość ok. 1 nC i był to punkt odniesienia dla obu badanych cieczy. Wartość ładunku rzędu 1 nC występowała przy 12 kV ( $\pm 1$  kV) dla estru syntetycznego, oraz 14 kV ( $\pm 1$  kV) dla oleju mineralnego. W czasie badań rejestrowano zakłócenia na poziomie ok. 20 pC, a poziom odcięcia ustalono na 100 pC. Badania przeprowadzono dla trzech wartości temperatury: 25°C, 30°C oraz 40°C.

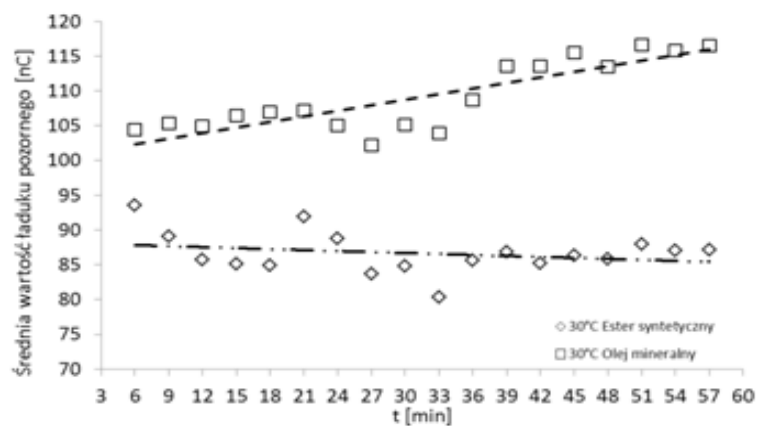
## 2.3. Wyniki badań

Seria pomiarowa składała się z sześciu pomiarów dla każdej temperatury. Jeden pomiar trwał 3600 sekund. Rejestrowano wartość ładunku pozornego oraz napięcia w funkcji czasu. Niepewność pomiaru ładunku pozornego wynosiła  $\pm 10\%$  [1]. Po pomiarach dokonano analizy zarejestrowanych przebiegów. W tym celu 3600-sekundową charakterystykę podzielono na 180-sekundowe okna czasowe. Po obliczeniu średniej liczby wyładowań, w tych oknach czasowych została zliczona średnia wartość ładunku pozornego wyładowań niepełnych.

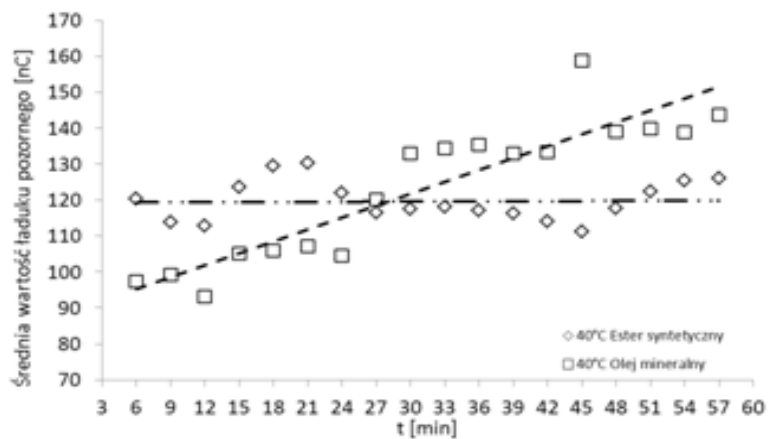
Na rysunkach 3, 4 oraz 5 przedstawiono wyniki badań dla obu cieczy izolacyjnych. Rysunek 6 przedstawia średnie wartości ładunku pozornego wnz, generowanych w badanych cieczy izolacyjnych, w zależności od temperatury. Z rysunku tego wynika, że w obu badanych cieczech istnieje pozytywna korelacja między temperaturą a wartością ładunku pozornego wnz.



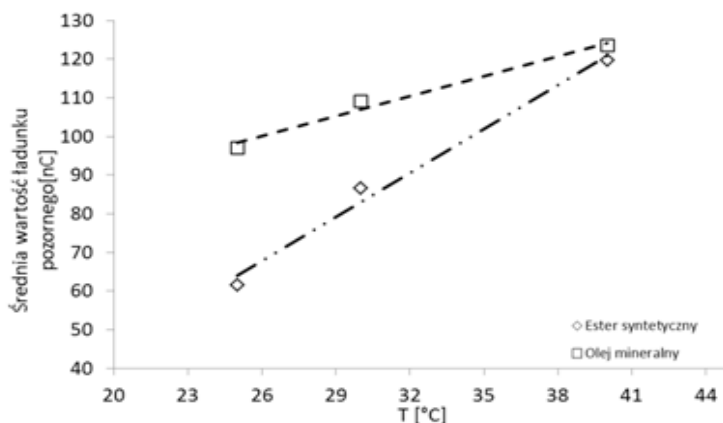
Rys. 3. Średnia wartość ładunku pozornego dla wnz, generowanych w układach izolacyjnych napelnionych estrem syntetycznym oraz olejem mineralnym; temperatura 25°C



Rys. 4. Średnia wartość ładunku pozornego dla wnz, generowanych w układach izolacyjnych napełnionych estrem syntetycznym oraz olejem mineralnym; temperatura 30°C



Rys. 5. Średnia wartość ładunku pozornego dla wnz, generowanych w układach izolacyjnych napełnionych estrem syntetycznym oraz olejem mineralnym; temperatura 40°C



Rys. 6. Średnia wartość ładunku pozornego dla wnz generowanych w estrze syntetycznym oraz oleju mineralnym dla temperatury 25°C, 30°C oraz 40°C

### 3. PODSUMOWANIE

Wykonano badania wyładowań niezupełnych w estrze syntetycznym oraz oleju mineralnym dla trzech wartości temperatury (25°C, 30°C oraz 40°C). Jedna seria pomiarowa składała się z sześciu pomiarów, po 3600 sekund dla każdej temperatury. Analizę danych przeprowadzono na 180-sekundowych oknach czasowych.

Godzinne badania wnz rozwijających się w estrze syntetycznym wykazały, że: w temperaturze 25°C średnia wartość ładunku pozornego zwiększa się z czasem, w 30°C maleje z czasem, a w 40°C pozostaje na niezmiennym poziomie. W oleju mineralnym, o temperaturze 25 °C, średnia wartość ładunku wnz maleje z czasem, natomiast w 30°C oraz 40°C rośnie. Ponadto, średnia wartość ładunku pozornego wnz generowanych w estrze syntetycznym (zwłaszcza w temperaturze 25°C oraz 30°C) jest o ok 30% niższa, niż dla oleju mineralnego (rysunek 6). Różnica w osiągnięciu wartości ładunku rzędu 1 nC (12 kV ±1 kV dla estru syntetycznego oraz 14 kV ±1 kV dla oleju mineralnego) oznacza, że wyładowania szybciej się zapalają i szybciej osiągają większe wartości ładunku w układzie izolacyjnym z estrem syntetycznym, niż w przypadku układu z olejem mineralnym. Prawdopodobnie jest to spowodowane zmniejszaniem się lepkości cieczy wraz ze wzrostem temperatury.

Godzinny czas trwania pomiaru okazuje się niewystarczający, by przy wykonywanej serii pomiarowej wyznaczyć jakąś tendencję zachowań wnz. Czas trwania pomiaru został przyjęty arbitralnie i powinien być zwiększony. Mimo tego uchybienia, wyniki badań wydają się obiecujące, dlatego będą kontynuowane dla dłuższego czasu pomiaru oraz szerszego zakresu temperatury, tj. od 20°C do 120°C.

## LITERATURA

- [1] PN EN 60270:2003, Wysokonapięciowa technika probiercza. Pomiary wyładowań niezupełnych.
- [2] Florkowska B., Gacek R., O stabilności wyładowań niezupełnych w izolacji papierowo-olejowej, Wyładowania niezupełne jako czynnik destrukcji izolacji, Powielarnia AGH, Kraków, 1972.
- [3] Meijer S., Gulski E., Agoris P, Cichecki P., Partial discharges diagnosis of power transformers, Międzynarodowa konferencja transformatorowa Transformator, Toruń, 2007, 41-49.
- [4] Wira A., Zybert R., Laboratorium z inżynierii wysokonapięciowej, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1982.
- [5] Experiences in Service with New Insulating Liquids, CIGRE WG A2.35, 2010.
- [6] Malinowski G., Badania wyładowań niezupełnych w oleju mineralnym i estrze syntetycznym, Energetyka, 10, 2012, 598-600.
- [7] Jezierski E., Hasterman Z., Transformatory, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1975.

### **DEPENDENCE OF TEMPERATURE ON PARTIAL DISCHARGES ACTIVITY IN SYNTHETIC ESTER-PAPER SETUP VS. OIL-PAPER SETUP**

Paper presents results of PD's investigations in synthetic ester-paper insulating setup vs. oil-paper insulated setup for three values of temperature (25°C, 30°C and 40°C). This article shows the test setup, measuring procedure and analysis of its results. Results show correlation between PD's activity and temperature of insulating setup. Results show also, that the synthetic ester-paper setup is more susceptible for PD's than the oil-paper insulating setup.