

doi:10.15199/48.2024.05.19

# Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną w dziedzinie częstotliwości suchego papieru celulozowego i aramidowego impregnowanego eksploatowanym oraz zregenerowanym estrem syntetycznym

**Streszczenie.** Niniejsza publikacja zawiera badania odpowiedzi dielektrycznej połączonego suchego papieru celulozowego i aramidowego (Nomex) impregnowanego eksploatowanym oraz zregenerowanym estrem syntetycznym (Midel 7131) dla różnych wartości temperatury. Procesy relaksacyjne badano metodą FDS (Frequency Domain Spectroscopy) stosując uogólnione równanie Havriliaka-Negamięgo. Do wykonania pomiarów użyto systemu DIRANA firmy OMICRON. Do prezentacji i analizy wyników pomiarów wykorzystano program OriginPro 2021 oraz WinFit firmy Novocontrol.

**Abstract.** This publication deals with the recognition of the influence of temperature on dielectric relaxation parameters of insulation based on cellulose and aramid paper impregnated with exploited and regenerated synthetic ester. Relaxation processes were investigated by FDS (Frequency Domain Spectroscopy). DIRANA OMICRON system, OriginPro 2021 and Novocontrol WinFit with Havriliak-Negami equation were used to analyze measurement results. (Influence of temperature on the dielectric response in the frequency domain of dry cellulose and aramid paper impregnated with exploited and regenerated synthetic ester).

**Słowa kluczowe:** ester syntetyczny, papier aramidowy, Nomex, Midel 7131.

**Keywords:** synthetic ester, aramid paper, Nomex, Midel 7131.

## Wstęp

Badania odpowiedzi dielektrycznej za pomocą metody spektroskopii dielektrycznej FDS (Frequency Domain Spectroscopy) pozwalają w dostatecznym stopniu oszacować zawilgocenie klasycznej izolacji transformatorów energetycznych [1]. Powyższa metoda polaryzacyjna oparta o dynamikę zmian relaksacyjnych oceny zawilgocenia izolacji stałej daje wynik uśredniony badanego obiektu. Na podstawie charakterystyk wzorcowych zawilgocenia lub analizy ilościowej i jakościowej odpowiedzi dielektrycznej w danej temperaturze można oszacować kondycję izolacji badanego urządzenia WN. Natomiast mogą powstawać poważne problemy diagnostyczne, gdy jednocześnie odpowiedź relaksacyjną stanowi kilka struktur dielektrycznych o różnych własnościach fizykochemicznych (olej, preszpan, aramid, granica faz papier-olej, warstwa zanieczyszczeń na celulozie) lub gdy szacowane jest zestawienie lub zawilgocenie nowoczesnych izolacji stałych np. papier aramidowy lub celulozowy – ester syntetyczny lub bioolej [2, 3].

W urządzeniach WN zawierających izolację stało-ciekłą wykorzystuje się fakt jej wysokiej wytrzymałości elektrycznej w stosunku do samych użytych materiałów składowych na bazie celulozy lub olejów transformatorowych. Ze względu na szybkie starzenie się izolacji celulozowej oraz stosunkowo niskiej wytrzymałości temperaturowej coraz częściej stosuje się inne materiały jak chociażby papier aramidowy. Natomiast oleje jako materiały izolacyjne spełniają dwie główne role: izolacji elektrycznej oraz chłodziwa. Użyty w eksperymencie badawczym MIDEL 7131 jest syntetycznym olejem transformatorowym na bazie estru, przystosowanym do większości typów i zastosowań transformatorów. Ważną cechą oleju MIDEL 7131 jest stosunkowo wysoka rozpuszczalność wody oraz fakt, iż zależność napięcia przebicia od stopnia zawilgocenia dla oleju MIDEL 7131 jest dużo większa niż dla innych cieczy stosowanych jako płyny dielektryczne [4].

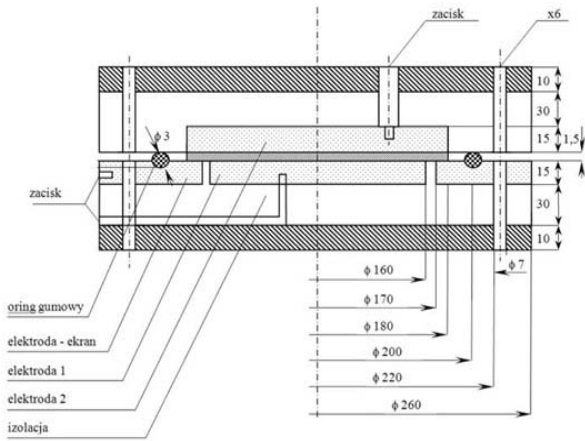
## Obiekt i metodyka

W celu przeprowadzenia badań wpływu temperatury impregnowanego eksploatowanym i zregenerowanym estrem syntetycznym suchego papieru celulozowego i aramidowego na podstawie pomiarów metodą spektroskopii dielektrycznej (FDS) zbudowano zespół elektrod pomiarowych, których schemat techniczny zaprezentowano na rysunku 1.

Pomiędzy elektrodami umieszczano dwa wysuszone w laboratoryjnej komorze próżniowej arkusze: jeden papieru celulozowego typu Kraft o grubości 0,5 mm oraz drugi papieru aramidowego Nomex typu 410 o grubości 0,76 mm. Impregnację przeprowadzano od razu po wyjęciu z suszarki próżniowej w hermetycznym pojemniku wypełnionym estrem syntetycznym umieszczonym w komorze klimatycznej, w temperaturze 40°C przy zawilgoceniu względnym 30% przez 14 dni. Następnie zespół elektrod umieszczano w komorze klimatycznej w celu wykonania pomiarów metodą spektroskopii dielektrycznej w zakresie wartości temperatury (20÷70)°C.

Medium impregnacyjne w postaci eksploatowanego estru Midel 7131 pobrano w wycofanej z eksploatacji i przeznaczonej do remontu jednostki transformatorowej pracującej na morskiej farmie wiatrowej zawierającej jako izolację stałą Nomex. Następnie przeprowadzono standardową regenerację eksploatowanego estru w Ośrodku Badawczo Rozwojowym Energetyki i przekazano w celach badawczych do Katedry Wysokich Napięć i Elektroenergetyki, Wydziału Elektrycznego, Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Wyniki badań porównawczych zawartości gazów rozpuszczonych w oleju metodą chromatografii gazowej (DGA) przed i po regeneracji zawarto w literaturze [5].

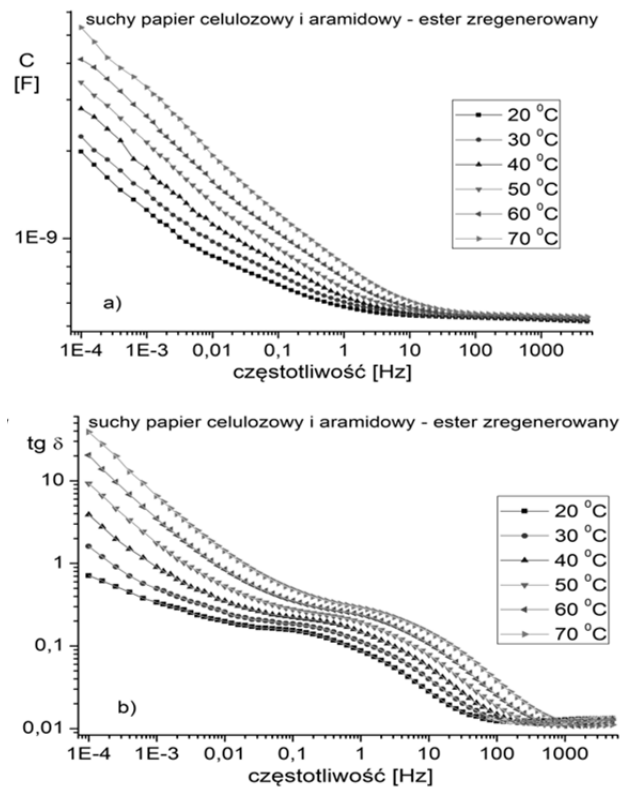
Do prezentacji i analizy wyników pomiarów wykorzystano program OriginPro 2021 oraz WinFit firmy Novocontrol. Do wyznaczenia podstawowych parametrów funkcji relaksacyjnych w dziedzinie częstotliwości zastosowano uogólnione równanie H-N (Havriliaka-Negamięgo) [5, 6].



Rys.1. Schemat elektrod pomiarowych

### Wyniki

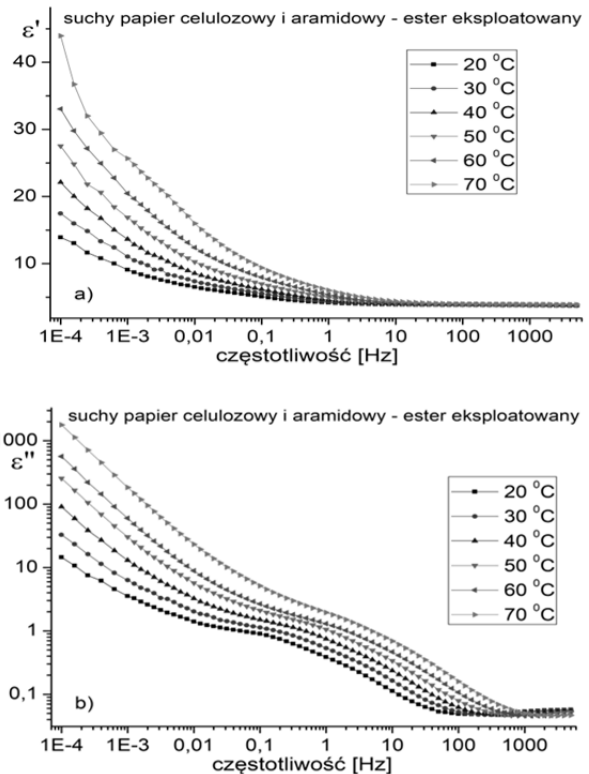
Z pomiarów otrzymano szereg charakterystyk FDS suchego papieru celulozowego i aramidowego impregnowanego zregenerowanym i eksploatowanym estrem syntetycznym dla różnych wartości temperatury (rys. 2 i 3).



Rys.2. Zmiany pojemności  $C$  (a) oraz współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  (b) dla różnych wartości temperatury od częstotliwości suchego papieru celulozowego i aramidowego impregnowanego zregenerowanym estrem syntetycznym

Przykładowe wyniki pomiarów pojemności  $C$  i współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  badanej izolacji zaprezentowano na rysunku 2. Natomiast przykładowe zmiany części rzeczywistej  $\epsilon'$  oraz urojonej  $\epsilon''$  przenikalności elektrycznej ukazano na rysunku 3. Wynika z nich, że zwiększanie wartości temperatury dla badanej izolacji powoduje największy wzrost wartości stratności charakteryzowanej przez współczynnik strat dielektrycznych  $tg\delta$  oraz urojoną część przenikalności elektrycznej  $\epsilon''$  w zakresie LF (niskiej częstotliwości) jednocześnie przesuwając te charakterystyki w kierunku wyższych

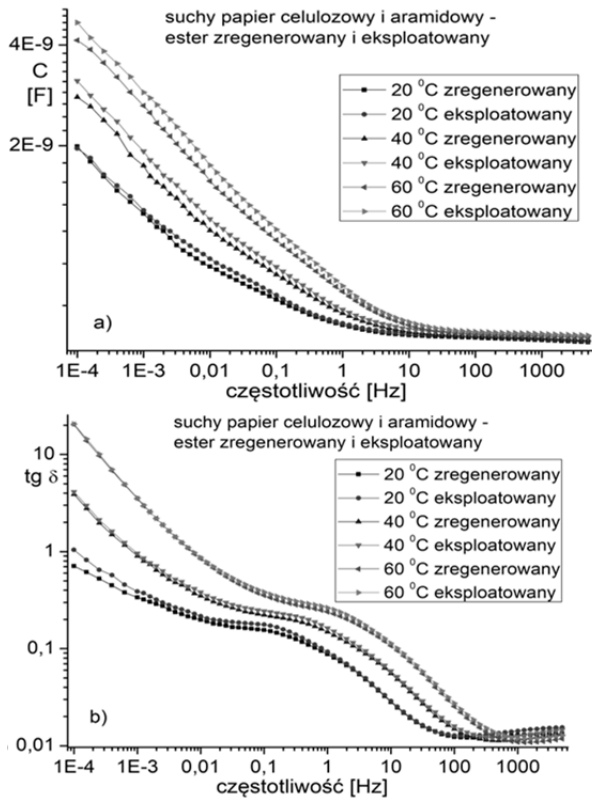
częstotliwości (rys. 2b i 3b). Jest to typowe zachowanie dla stało - ciekłego układu dielektrycznego, które można opisać prawem Arrheniusa. Podobnie zachowują się zmiany pojemności  $C$  i rzeczywistej części przenikalności elektrycznej  $\epsilon'$  (rys. 2a i 3a).



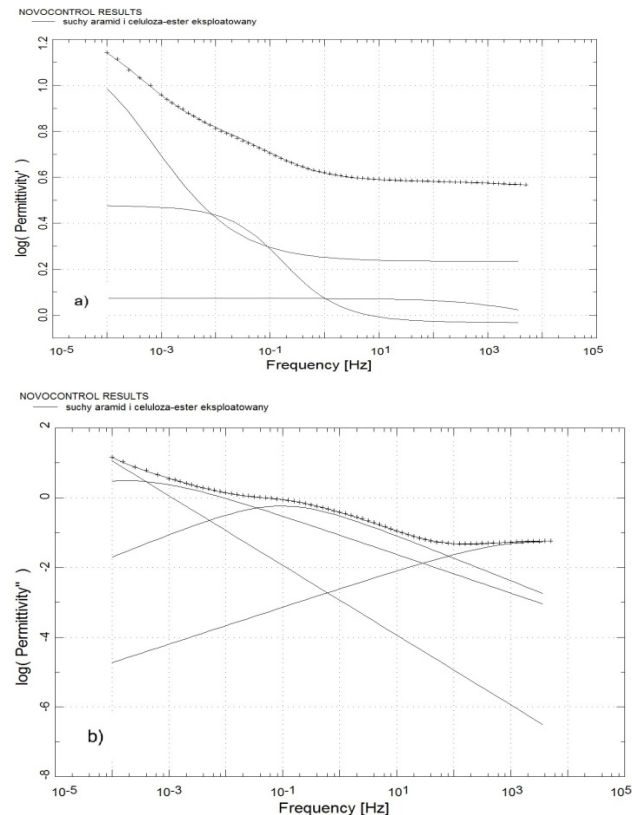
Rys.3. Zmiany części rzeczywistej  $\epsilon'$  (a) oraz urojonej  $\epsilon''$  (b) przenikalności elektrycznej dla różnych wartości temperatury od częstotliwości suchego papieru celulozowego i aramidowego impregnowanego eksploatowanym estrem syntetycznym

### Analiza

Analiza porównawcza zmian pojemności  $C$  oraz współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  dla suchego medium izolacyjnego w wybranych wartościach temperatury 20°C, 40°C, 60°C dla eksploatowanego i zregenerowanego estru syntetycznego zaprezentowano na rysunku 4, gdzie głównie w zakresie niskich i średnich rejestrowanych częstotliwości następuje przewidywany efekt wzrostu pojemności i strat dielektrycznych dla eksploatowanego medium impregnacyjnego. Zmiany współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  dowodzą istnienia trzech procesów relaksacyjnych w badanym spektrum częstotliwości (rys. 4b). Pierwszy proces H-N1 występuje w zakresie LF (poniżej 0,01 Hz) i jest znacząco przyspieszony gwałtownymi zmianami przewodnictwa wraz ze wzrostem temperatury. Przykładowo zmiana współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  dla częstotliwości 10<sup>-4</sup> Hz wynosi około trzech rzędów wielkości. Kolejny i zarazem główny proces elektryczny H-N2 występuje w zakresie około 0,1÷10 Hz i jest charakteryzowany przez lokalne maksimum lub punkt przecięcia na charakterystyce  $tg\delta$ . Ponadto w zakresie HF (wysokiej częstotliwości) prawdopodobnie istnieje trzeci proces relaksacyjnego H-N3 widoczny po lokalnym minimum na charakterystykach  $tg\delta$ . Jest on najlepiej widoczny dla niskiej temperatury, gdyż zaczyna się od częstotliwości około 10<sup>3</sup> Hz. Stała czasowa tego procesu prawdopodobnie rośnie wraz ze wzrostem wartości temperatury i nie jest w pełni obserwowalna ze względu na ograniczony zakres pomiarowy systemu Dirana (do 5 kHz).



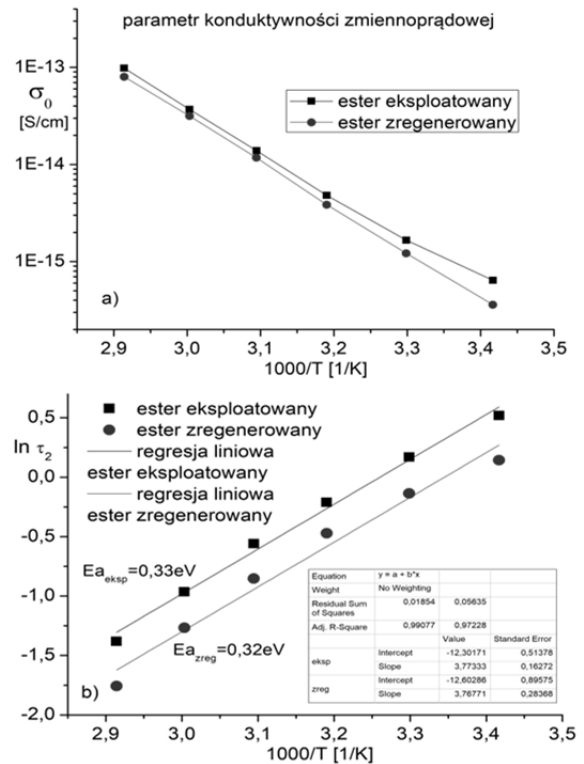
Rys. 4. Porównanie zmian pojemności  $C$  (a) oraz współczynnika strat dielektrycznych  $\operatorname{tg}\delta$  (b) dla wybranych wartości temperatury od częstotliwości suchego papieru celulozowego i aramidowego impregnowanego zregenerowanym oraz eksploatowanym estrem syntetycznym



Rys. 5. Analiza procesów relaksacyjnych suchego papieru celulozowego i aramidowego impregnowanego eksploatowanym estrem syntetycznym dla temperatury  $20^{\circ}\text{C}$  z wykorzystaniem równania H-N, (a) części rzeczywistej  $\epsilon'$  przenikalności elektrycznej oraz (b) części urojonej  $\epsilon''$  przenikalności elektrycznej

Analiza uzyskanych danych pomiarowych dla suchego papieru celulozowego i aramidowego impregnowanego eksploatowanym oraz zregenerowanym estrem syntetycznym z uwzględnieniem zmian pojemności po przeliczeniu na rzeczywistą  $\epsilon'$  oraz urojoną  $\epsilon''$  część przenikalności elektrycznej dla różnej częstotliwości została przeprowadzona w programie WinFit za pomocą równania Havriliaka-Negamięgo [6]. W ten sposób ilościowo oszacowano podstawowe parametry występujących relaksacji dielektrycznych badanej izolacji. Na rysunku 5 ukazano przykładowy proces aproksymacji w postaci zrzutów ekranu z programu WinFit dla suchego papieru celulozowego i aramidowego impregnowanego eksploatowanym estrem syntetycznym dla temperatury  $20^{\circ}\text{C}$ .

Wybrano najbardziej czułe parametry analizy ilościowej na zmiany temperatury oraz rodzaj użytego ciekłego medium izolacyjnego i zaprezentowano je w układzie Arrheniusa (rys. 6). Stosunkowo duże zmiany wartości kondukcyjności wynoszące od  $3,6 \cdot 10^{-16}$  S/cm dla temperatury  $20^{\circ}\text{C}$  do  $1,0 \cdot 10^{-13}$  S/cm dla temperatury  $70^{\circ}\text{C}$  w praktyce mogą ułatwiać szacowanie zawilgocenia izolacji stało-ciekłej urządzeń w różnej temperaturze (rys. 6a).



Rys. 6. Wykres Arrheniusa dla (a) parametru kondukcyjności zmiennoprądowej  $\sigma_0$  oraz (b) zmian stałych czasowych średnio częstotliwościowego procesu relaksacyjnego H-N2 suchego papieru celulozowego i aramidowego impregnowanego eksploatowanym lub zregenerowanym estrem syntetycznym

Ponieważ zmiany stałej czasowej  $\tau_2$  głównego procesu relaksacyjnego H-N2 od temperatury przedstawione na wykresie Arrheniusa posiadają liniowy charakter, można w prosty sposób obliczyć jego energię aktywacji (rys. 6b) [5]. Wynosi ona dla suchej badanej izolacji  $E_a = 0,32 \div 0,33 \text{ eV}$ . Obliczone wartości energii aktywacji są porównywalne do klasycznej izolacji papierowo – olejowej, gdzie wartość ta mieści się w przedziale  $0,3 \div 0,45 \text{ eV}$  i związana jest z obecnością wody w postaci nanokropel połączonych z celulozą wiązaniami Van der Waalsa, a przewodnictwo związane jest z „hoopingiem” jonów pomiędzy tymi kroplami [1, 5, 7].

## Wnioski

Przeprowadzona analiza badanej izolacji odpowiedzi dielektrycznej za pomocą metody FDS wykazała, że:

- rejestrowany wzrost współczynnika strat dielektrycznych eksploatowanego medium izolacyjnego w stosunku do zregenerowanego występuje w zakresie niskich i średnich częstotliwości,
- w zakresie średnio częstotliwościowym następuje wraz z regeneracją oleju skrócenie stałej czasowej  $\tau_2$  głównego procesu relaksacyjnego H-N 2,
- wzrost temperatury powoduje wzrost wartości współczynnika strat dielektrycznych  $tg\delta$  w zakresie LF jednocześnie przesuując te charakterystyki w kierunku wyższych częstotliwości. Związane jest to ze skokową zmianą przewodnictwa elektrycznego i zachowaniem opisanym przez prawo Arrheniusa,
- na podstawie zmian stałej czasowej głównego procesu relaksacyjnego H-N 2 od temperatury przedstawionej na wykresie Arrheniusa obliczono wartość energii aktywacji. Wynosi ona dla suchego papieru celulozowego i aramidowego  $E_a=0,32 \div 0,33$  eV,
- zaprezentowane wyniki badań zjawisk relaksacyjnych stanowią bazę do przyszłej diagnostyki urządzeń wykonanych z izolacji papier transformatorowy + Nomex – ester syntetyczny.

**Autor:** dr inż. Marek Zenker, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, Katedra Elektrotechnologii i Diagnostyki, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel. 91 449 47 54, E-mail: marek.zenker@zut.edu.pl;

## LITERATURA

- [1] Żukowski P., Kołtunowicz T.N., Kierczyński K., Rogalski P., Subocz J., Szrot M., Gutten M., Sebok M., Jurcik J., Permittivity of a composite of cellulose, mineral oil, and water nanoparticles: theoretical assumptions, *Cellulose*, 23 (2016), 175 – 183
- [2] Walczak K., Mościcka-Grzesiak H., Przybyłek P., Morańda H., Szewczyk R., Frequency Dielectric Response of Aramid Enhanced Cellulose Paper in Aspect of Its Water Content Determination, *Przegląd Elektrotechniczny*, 97 (2021), Nr 8, 23-26
- [3] Zenker M., Mroziak A., Odpowiedź dielektryczna papieru aramidowego impregnowanego estrem syntetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94 (2018), Nr 10, 164-167
- [4] <https://www.midel.com/>; zasoby internetowe na dzień 06.03.2023
- [5] Zenker M., Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną w dziedzinie częstotliwości papieru aramidowego impregnowanego eksploatowanym i zregenerowanym estrem syntetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), Nr 10, 225-228
- [6] Havriliak S. Jr., Havriliak S. J., Dielectric and Mechanical Relaxation in Materials. Analysis, Interpretation, and Application to Polymers, Hanser Publishers, Munich, Vienna, New York, 1997
- [7] Żukowski P., Rogalski P., Kołtunowicz T.N., Kierczyński K., Zenker M., Pogrebnjak A. D., Kucera M., DC and AC Test of Moisture Electrical Pressboard Impregnated with Mineral Oil or Synthetic Ester – Determination of Water Status in Power Transformer Insulation, *Energies*, 15 (2022), Iss. 8, nr 2859