

## Wpływ degradacji termicznej papieru aramidowego na mechanizmy polaryzacji izolacji impregnowanej olejem w dziedzinie wysokich częstotliwości

**Streszczenie.** Artykuł prezentuje wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych na próbkach izolacji aramidowej impregnowanej mineralnym olejem izolacyjnym. Próbki papieru aramidowego poddano procesowi przyspieszonej degradacji termicznej, który polegał na jego wygrzewaniu jeszcze przed impregnacją w temperaturze 250°C przez określony czas. Analizie poddano wpływ stopnia zesterzenia papieru aramidowego na część rzeczywistą oraz urojoną zespolonej przenikalności elektrycznej w zakresie temperatury od 20°C do 100°C.

**Abstract.** The paper presents the results of laboratory investigations carried out on aramid insulation impregnated with mineral insulating oil. Aramid paper samples were subjected to the process of accelerated thermal degradation, which consisted in its heating still before impregnation in temperature of 250°C for a definite time period. The analysis was subjected to influence of the aramid paper aging degree on real and imaginary part of permittivity in the temperature range from 20°C to 100°C. (The influence of thermal degradation of aramid paper on the polarization mechanisms oil-impregnated insulation in high frequency domain).

**Słowa kluczowe:** transformatory mocy, izolacja aramidowo-olejowa, metoda spektroskopii częstotliwościowej, model Jonschera.

**Keywords:** power transformers, aramid-oil insulation, frequency dielectric spectroscopy, Jonscher model.

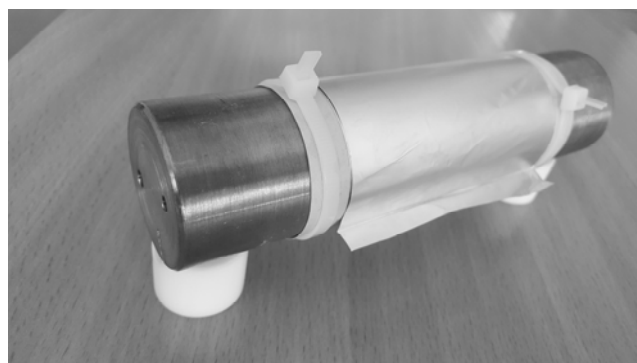
### Wstęp

Obecna sytuacja prawno-ekonomiczna praktycznie zmusza właścicieli sieci elektroenergetycznych do podejmowania intensywnych kroków w celu zmniejszenia kosztów eksploatacji oraz ryzyka wystąpienia szkody dla środowiska naturalnego w wyniku awarii eksploatowanych urządzeń. Jednym z podejmowanych działań przez producentów urządzeń elektroenergetyki zawodowej w celu osiągnięcia powyższych dążeń jest projektowanie sprzętu wykonanego z bardziej trwałych materiałów. Drugim działaniem, które powinny realizować głównie użytkownicy urządzeń jest właściwa eksploatacja uzupełniana o monitoring kluczowej dla systemu aparatury. W przypadku transformatorów energetycznych izolacja stała oraz ciepla, dotychczas wykonywana z celulozy impregnowanej mineralnym olejem izolacyjnym, coraz częściej będzie zastępowana izolacją syntetyczną, wykonywaną głównie z papierów aramidowych docelowo impregnowanych przyjaznymi dla środowiska ekstrami syntetycznymi [1, 2, 3, 4, 7, 8]. W porównaniu z celulozą, stosowanie aramidów powoduje znaczny wzrost odporności na wysokie temperatury, która obecnie jest głównym czynnikiem wpływającym na przedwczesne starzenie się izolacji [3, 4, 7]. Ponadto papiery aramidowe wykazują zdecydowanie lepsze własności mechaniczne (np. odporność na zrywanie) oraz elektryczne (np. wytrzymałość na przebicie czy rezystywność skośną i powierzchniową). Jednakże, przy projektowaniu układów izolacyjnych typu aramid-olej, zwłaszcza w układach z wymuszonym przepływem oleju, należy rozważyć dużą podatność aramidów na zjawisko elektryzacji strumieniowej [5]. Ponieważ prawdopodobnie, główną przyczyną ewentualnej awarii transformatora dużej mocy z izolacją aramidową może być uszkodzenie izolacji stałej spowodowane jej zesterzeniem, dlatego oprócz szacowania stopnia zawilgocenia istotne jest opracowanie metody nieinwazyjnego szacowania stopnia degradacji termicznej [3, 4, 8]. Artykuł prezentuje badania wpływu przyspieszonej degradacji termicznej próbek papieru aramidowego na charakterystyki zespolonej przenikalności elektrycznej w dziedzinie wysokich częstotliwości.

### Sposób przygotowania próbek

Próbki izolacji wykonano z transformatorowego papieru aramidowego Nomex® Typ 410 o grubości 50 µm. Papier

aramidowy pocięto w paski o wymiarach 1300 mm x 100 mm. Następnie, jeszcze przed impregnacją, próbki poddano procesowi przyspieszonego starzenia poprzez umieszczenie ich w sterylizatorze i wygrzewanie w temperaturze 250°C przez określony czas. Uzyskano w ten sposób 5 stopni zesterzenia próbek: 1- 0 h starzenia (papier świeży), 2- 100 h starzenia, 3- 200 h, 4- 300 h i 5- 400 h starzenia. Po etapie przyspieszonego starzenia próbki umieszczono w próżni i wygrzewano w 100°C przez 2 h celem ich wysuszenia przed impregnacją. Do impregnacji próbek wykorzystano inhibitowany mineralny olej izolacyjny firmy Nynas oznaczony jako Nytro 10 X. Po procesie impregnacji próbki nawijano na elektrodę niskiego potencjału, którą stanowił wałek mosiężny o wymiarach własnych 160 mm długości i średnicy 40 mm. Uzyskano tym samym 10 warstw izolacji. Elektrodę wysokiego potencjału wykonano z cienkiej folii aluminiowej o szerokości 80 mm. Folię nawinięto na wałek z próbką. Rysunek 1 przedstawia układ gotowy do badań. Badania przeprowadzono w hermetycznej komorze wyposażonej w układ regulacji i stabilizacji temperatury.

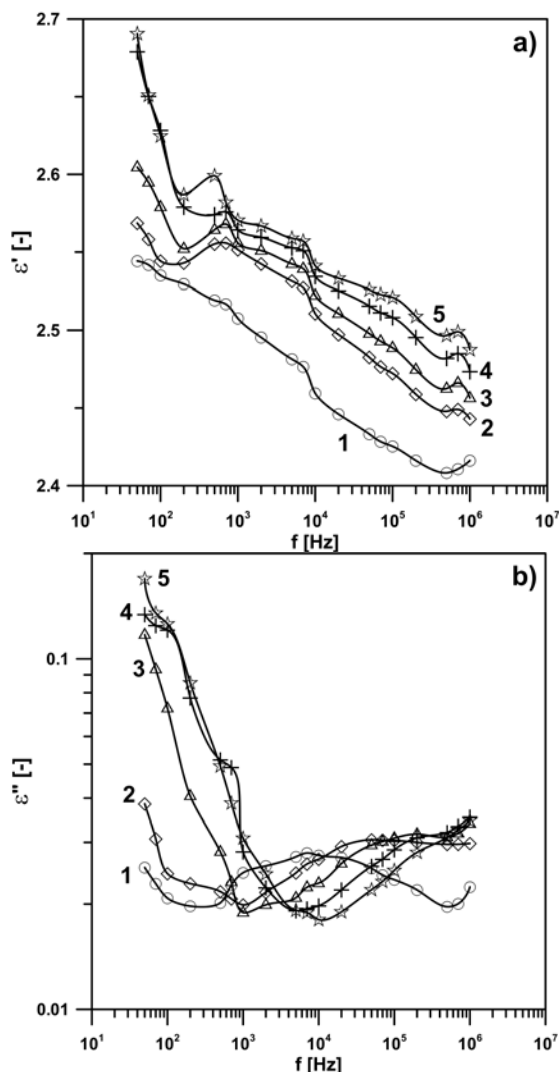


Rys. 1. Układ elektrod pomiarowych wraz z nawiniętą próbką izolacji aramidowo-olejowej

### Wyniki badań

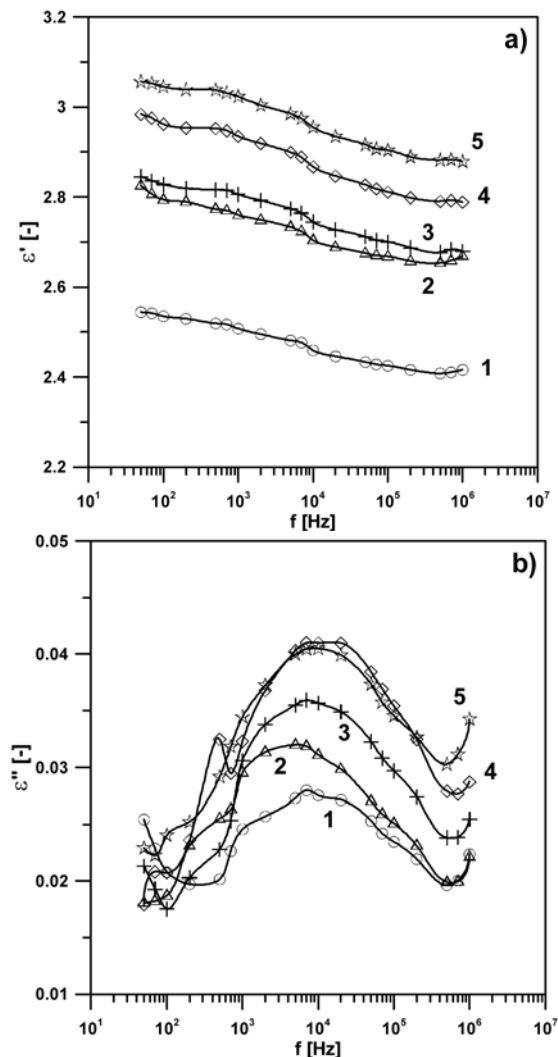
Pomiary współczynnika stratności tgδ oraz pojemności C próbek przeprowadzono wykorzystując mostek RLC firmy GwINSTEK typu LCR-8101 w zakresie częstotliwości napięcia pomiarowego od 50 Hz do 1 MHz. Badania wykonano dla 5 temperatur izolacji w zakresie od 20°C do

100°C ze zmianą co 20°C. Pozyskane w ten sposób dane pozwoliły na wyznaczenie dyspersyjnych charakterystyk zespolonej przenikalności elektrycznej izolacji. Rysunek 2 przedstawia wpływ temperatury izolacji na część rzeczywistą  $\varepsilon'$  oraz urojoną  $\varepsilon''$  przenikalności elektrycznej dla próbki niestarzonej.



Rys. 2. Wpływ temperatury na charakterystyki dyspersyjne części rzeczywistej (a) oraz urojonej (b) zespolonej przenikalności elektrycznej próbki izolacji aramidowo-olejowej niestarzonej; 1- 20°C, 2- 40°C, 3- 60°C, 4- 80°C, 5- 100°C

W przypadku  $\varepsilon'$  (rys. 2a) zaobserwować można praktycznie proporcjonalny wzrost wartości przenikalności wraz z temperaturą w całym zakresie obserwowanych częstotliwości. Dla części urojonej  $\varepsilon''$  (rys. 2b) odnotowano wyraźne maksimum przenikalności w temperaturze 20°C przy częstotliwości ok. 10 kHz. Ponadto wraz ze wzrostem temperatury zaobserwowane maksimum przemieszcza się w stronę częstotliwości wyższych. Niestety maksymalna wartość częstotliwości napięcia pomiarowego posiadanej aparatury wynosiła 1 MHz, co spowodowało brak części charakterystyk dla wyższych temperatur, które pozwalałyby precyzyjnie oszacować przesuwające się maksimum przenikalności  $\varepsilon''$ . Powyższe obserwacje potwierdzono dla wszystkich stopni zesterzenia próbek. Postanowiono tym samym przeanalizować wpływ stopnia zesterzenia papieru aramidowego w temperaturze pomiarowej 20°C na charakterystyki dyspersyjne zespolonej przenikalności z uwagi na możliwie najdokładniejsze oszacowanie wartości maksimum  $\varepsilon''$ .



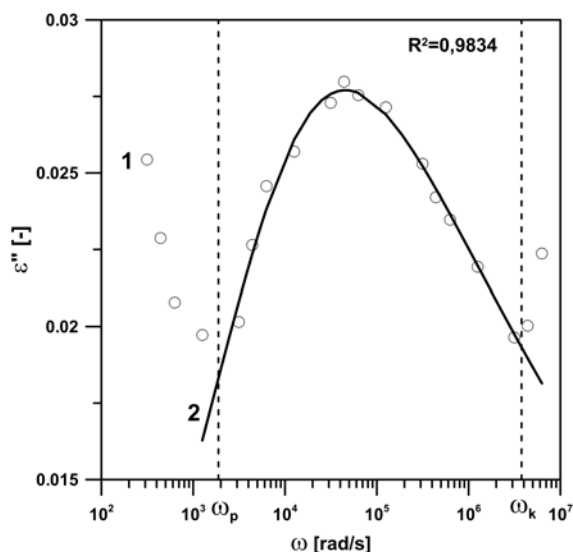
Rys. 3. Wpływ stopnia degradacji termicznej papieru aramidowego impregnowanego mineralnym olejem izolacyjnym na charakterystyki dyspersyjne części rzeczywistej (a) oraz urojonej (b) zespolonej przenikalności elektrycznej; 1- 0 h starzenia, 2- 100 h starzenia, 3- 200 h starzenia, 4- 300 h starzenia, 5- 400 h starzenia

W przypadku  $\varepsilon'$  (rys. 3a) wzrost stopnia zesterzenia papieru aramidowego wywołuje odpowiednie przyrosty  $\varepsilon'$  w całym zakresie częstotliwości i co istotne, charakterystyki nie przecinają się ze sobą. Również w przypadku  $\varepsilon''$  (rys. 3b) maksimum przenikalności rośnie wraz ze wzrostem stopnia zesterzenia i nie przesuwają się. Pozwala to sądzić, że zaobserwowany proces relaksacji makrocząstek włókien aramidowych jest wrażliwy na stopień termicznej degradacji papieru. Podjęto próbę analizy tego zjawiska wykorzystując znany w literaturze model Jonschera dla dielektryków polarnych [1, 2, 6], który dla urojonej części przenikalności  $\varepsilon''$  prezentuje wzór:

$$(1) \quad \varepsilon''(\omega) = \frac{\varepsilon''_m}{\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^{-m} + \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^{1-n}}$$

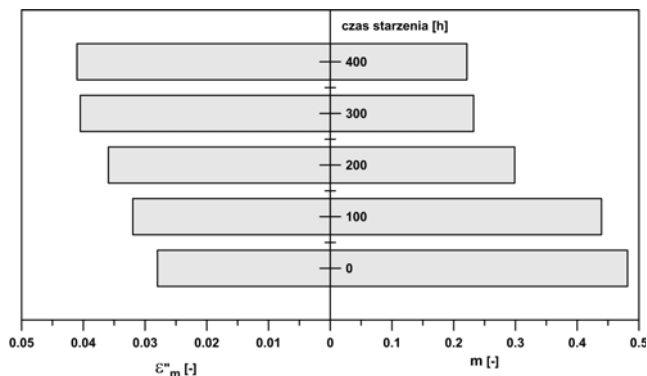
gdzie:  $\omega$  – pulsacja,  $\omega_1$  i  $\omega_2$  – pulsacje charakterystyczne w zakresie odpowiednio niskiej i wysokiej częstotliwości,  $m$  i  $n$  – współczynniki opisujące odpowiednio proces narastania i zanikania przenikalności w zakresie niskich i wysokich częstotliwości.

Aby uzyskać jak najlepsze dopasowanie modelu do analizowanego zjawiska postanowiono zawęzić obszar analizy do zakresu częstotliwości od 300 Hz do 500 kHz (rys. 4).



Rys. 4. Przykładowa aproksymacja funkcją Jonschera dyspersyjnej charakterystyki części urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej dla próbki aramidowo-olejowej niestarzonej w temperaturze pomiaru 20°C

Aproksymację przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania Matlab oraz metody dopasowania z algorytmem genetycznym. Kryterium wyboru optymalnego dopasowania oparto na jak najwyższym współczynniku determinacji  $R^2$ . Dla wszystkich stopni zesterzenia uzyskano wartość współczynnika  $R^2$  powyżej 0,95. Rysunek 5 przedstawia wpływ stopnia zesterzenia papieru aramidowego dla temperatury pomiaru 20°C na wartości parametrów  $\varepsilon_m$  oraz  $m$  modelu Jonschera. Wzrost stopnia zesterzenia wywołuje mierzalny przyrost wartości maksimum przenikalności  $\varepsilon''$  oraz spadek parametru  $m$ . Przyczynę tego zjawiska upatrywać można w sklejanii się włókien aramidowych papieru na skutek jego wygrzewania w wysokiej temperaturze. Tworzą się tym samym większe struktury polarne, które generują zwiększenie wartości stratności dielektryka. Ponadto deformowana jest powierzchnia samego papieru, co zaobserwowano w trakcie badań. Pozostałe parametry modelu Jonschera zmieniały się na granicy błęd pomiarowego oraz w sposób niepowtarzalny.



Rys. 5. Wpływ stopnia degradacji termicznej papieru aramidowego impregnowanego mineralnym olejem izolacyjnym na wybrane parametry funkcji Jonschera w temperaturze pomiaru 20°C

## Wnioski końcowe

Przeprowadzone badania dowodzą celowości analizowania zmian zespolonej przenikalności elektrycznej izolacji wykonanej z papieru aramidowego impregnowanego mineralnym olejem izolacyjnym również w zakresach wyższych częstotliwości. O ile szacowanie stopnia zawilgocenia izolacji aramidowo-olejowej metodą FDS w zakresach niskich częstotliwości jest jak najbardziej właściwe [1, 2], o tyle wpływ stopnia degradacji termicznej włókien aramidowych można analizować również w zakresach zdecydowanie wyższych. Ponadto, zastosowanie wysokich częstotliwości praktycznie eliminuje wpływ obecności cząsteczek wody jako silnie polarnych na przebieg ww. charakterystyk, co umożliwia dokładniejszą obserwację zmian wywołanych jedynie zesterzeniem. Otwartą kwestią pozostaje niewątpliwie wpływ impregnacji estrami syntetycznymi oraz oddziaływanie produktów starzenia samej cieczy izolacyjnej. Wymaga to przeprowadzenia dalszych badań. Prezentowane w pracy [8] wyniki dla innej metody polaryzacyjnej pozwalają mieć nadzieję, że również w przypadku impregnacji estrem syntetycznym oddziaływanie zesterzenia włókien aramidowych będzie również w dziedzinie częstotliwości mierzalne.

Prezentowane wyniki w artykule traktować należy jedynie jako wstępne, wskazujące na możliwość wykorzystania zakresu wysokich częstotliwości do analizy zmian starzeniowych w tego typu izolacji. Uwzględniając przewidywalne trudności implementacji prowadzenia takich badań na obiektach rzeczywistych prawdopodobnym jest, że opisywana metoda będzie ograniczona jedynie do badań czysto laboratoryjnych.

**Autor:** dr hab. inż. Stefan Wolny, prof. PO, E-mail: s.wolny@po.opole.pl

## LITERATURA

- [1] Zenker M., Subocz J., Dielectric Response of Oil Impregnated Nomex in Frequency and Time Domain, *Przegląd Elektrotechniczny*, 8 (2016), 55-58
- [2] Zenker M., Odpowiedź dielektryczna Nomexu impregnowanego estrem syntetycznym na podstawie pomiarów metodą PDC, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10 (2016), 26-29
- [3] Fofana I., Borsi H., Gockenbach E., Farzaneh M., Aging of transformer insulating materials under selective conditions, *Electrical Energy Systems*, Vol. 17, Issue 5 (2007), 450-470
- [4] Zodeh O. M., Whearty R. J., Thermal characteristics of a meta-aramid and cellulose insulated transformer at loads beyond nameplate, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 12, Issue 1 (1997), 234-248
- [5] Zdanowski M., Streaming Electrification of Mineral Insulating Oil and Synthetic Ester MIDEI 7131, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 21, Issue 3 (2014), 1127-1132
- [6] Jonscher A. K., The universal dielectric response and its physical significance, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. 27, Issue 3 (1992), 407-423
- [7] Wolny S., Lepich M., Adamowicz A., Wpływ stopnia termicznej degradacji papieru aramidowego na jego własności mechaniczne i elektryczne, *Prace Instytutu Elektrotechniki*, Zeszyt 261, Warszawa (2013), 77-84
- [8] Wolny S., Lepich M., Influence of ageing and moisture degree of aramid-oil insulation on depolarization current, *2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, Montpellier, France, 3-7 July (2016), 1163-1166