

Analiza charakterystyk dyspersyjnych papieru aramidowego impregnowanego estrem naturalnym i syntetycznym w dziedzinie wysokich częstotliwości

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych wykonanych na próbkach izolacji aramidowej impregnowanej estrami, naturalnym i syntetycznym. 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 charakterystyki dyspersyjne pojemności i współczynnika strat 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 esters, natural and synthetic. 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 dispersion characteristics of capacitance and loss factor in the temperature range from 20°C to 100°C. (Analysis of dispersion characteristics of aramid paper impregnated with natural and synthetic ester in the high frequencies domain).

Słowa kluczowe: izolacja aramidowo-olejowa, spektroskopia dielektryczna, charakterystyki dyspersyjne, degradacja termiczna.

Keywords: aramid-oil insulation, dielectric spectroscopy, dispersion characteristics, thermal degradation.

Wstęp

Dynamiczny rozwój jaki dokonuje się obecnie w dziedzinie szeroko rozumianej inżynierii materiałowej, daje konstruktorom urządzeń elektroenergetycznych możliwości projektowe, które byłyby praktycznie niewykonalne jeszcze dwie dekady lat temu. Ponadto, szukanie nowych oraz udoskonalanie obecnych materiałów elektroizolacyjnych dodatkowo stymuluje presja konkurencyjnego rynku, rygorystyczne przepisy w zakresie jakości energii, zapewnienia ciągłości dostaw oraz ochrony środowiska naturalnego. Niemalże pewnym jest, że klasyczna izolacja celulozowo-olejowa jaka jeszcze obecnie dominuje w transformatorach energetycznych zastępowana będzie izolacją syntetyczną lub w okresie przejściowym półsyntetyczną. Opiswany trend jest już wyraźnie widoczny w przypadku transformatorów suchych oraz izolacji maszyn wirujących. Oczywiście stosowanie nowych materiałów niesie oprócz niewątpliwych zalet, jak lepsze właściwości termiczne, mechaniczne i elektryczne, również szereg zagrożeń związanych z ich wieloletnią eksploatacją. W przypadku nowoczesnej izolacji zwojowej, tak maszyn wirujących jak i transformatorów, największe uznanie zyskują papiery syntetyczne, wykonane na bazie włókna aramidowego [1, 2, 3]. Materiały te mogą pracować jako izolacja sucha lub impregnowana. Dla konstrukcji energetycznych transformatorów mocy, ma to kolosalne znaczenie z uwagi na konieczność wyprowadzania znacznych ilości ciepła, które generowane jest podczas ich eksploatacji. W porównaniu z celulozą, włókno aramidowe cechuje znacznie wyższa odporność na oddziaływanie wysokich temperatur, która obecnie jest podstawowym czynnikiem odpowiedzialnym za przyspieszone starzenie się izolacji [2, 3, 4, 5]. Ponadto, nie bez znaczenia są zdecydowanie lepsze od celulozy własności mechaniczne (np. siła zrywająca czy sprężystość) oraz elektryczne (np. napięcie przebicia czy rezystywność skrośna i powierzchniowa). Jednakże, przy projektowaniu układów izolacyjnych typu aramid-ester w układach z wymuszonym przepływem cieczy, należy rozważyć dużą podatność aramidów na zjawisko elektryzacji strumieniowej [6].

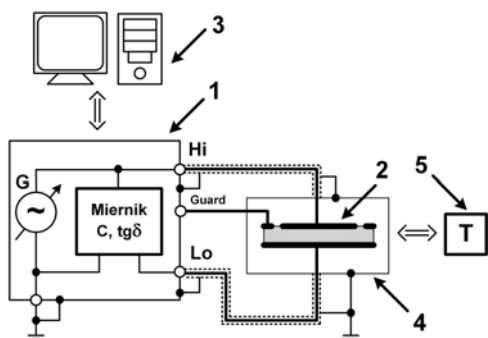
Analizując ewentualne przyczyny awarii transformatora mocy z pełną izolacją aramidową, w którym jako izolację ciekłą wykorzystano ester syntetyczny można dojść do wniosku, że nie bez znaczenia jest proces starzenia się

tego typu izolacji. Niestety, z uwagi na znikomą liczbę wykonanych w tej technologii transformatorów będących w eksploatacji, trudno jest obecnie o praktyczną weryfikację tego stwierdzenia. Brak wiedzy eksperckiej jest poza tym jedną z przyczyn (oprócz niewątpliwie wyższej ceny urządzeń) opóźnienia rozpowszechniania się takich konstrukcji. Niepewność inwestorów w zakresie wieloletniej, możliwie bezawaryjnej eksploatacji transformatorów z izolacją aramidową powiązana z dopiero rozwijającą się diagnostyką adaptowaną z metod stosowanych dla klasycznej izolacji celulozowej, stanowi duże wyzwanie technologiczne, ekonomiczne i naukowe [1, 2, 3, 7]. Niniejszy artykuł wpisuje się w trend badań laboratoryjnych izolacji aramidowej impregnowanej estrem naturalnym i syntetycznym, czyli cieczami przyjaznymi środowisku ze względu na swą biodegradowalność. Z uwagi na długotrwałość procesu starzenia się włókien aramidowych postanowiono zastosować metodę przyspieszonej degradacji termicznej materiału przed impregnacją oraz z dostępnym powietrzem, poprzez jego wygrzewanie w temperaturze przekraczającej klasę temperaturową materiału.

Układ pomiarowy

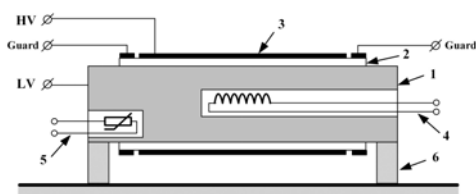
Pomiary współczynnika strat $tg\delta$ oraz pojemności C próbek przeprowadzono wykorzystując mostek RLC firmy GWINSTEK typu LCR-8101 w zakresie częstotliwości napięcia pomiarowego od 50 Hz do 1 MHz. Mając jednak na uwadze fakt, że miernik niestety generuje zwiększone błędy pomiarowe na obu krańcach zakresu częstotliwości, postanowiono w artykule zaprezentować wyniki badań wykonane w zakresie od 200 Hz do 200 kHz. Badania wykonano dla 5 temperatur izolacji w zakresie od 20°C do 100°C ze zmianą co 20°C. Rysunek 1 przedstawia układ pomiarowy. Badanym obiektem była próbka izolacji aramidowo-olejowej nawinięta na elektrodę niskiego potencjału, którą stanowił wałek mosiężny o wymiarach własnych 160 mm długości i średnicy 40 mm. Po nawinięciu badanego materiału uzyskano 10 warstw izolacji. Elektrode wysokiego potencjału wykonano z cienkiej folii aluminiowej o szerokości 80 mm. Folię nawinięto na wałek z próbką. Dodatkowo zastosowano elektrody ochronne wykonane z drutu miedzianego oraz izolacyjne opaski zaciskowe, które zapobiegały samoistnemu rozwijaniu się materiału.

Rysunek 2 przedstawia układ elektrod gotowy do badań. Badania przeprowadzono w hermetycznej ekranowanej komorze wyposażonej w dedykowany układ do regulacji i stabilizacji temperatury. Na rysunku 3 przedstawiono zdjęcie przykładowej próbki izolacji jeszcze przed umieszczeniem jej w naczyniu pomiarowym.



Rys.1. Schemat układu pomiarowego do badania próbek izolacji aramidowo-olejowej w dziedzinie wysokich częstotliwości

1- miernik RLC (GwINSTEK LCR-8101; 50 Hz – 1 MHz) , 2- próbka izolacji aramidowo-olejowej, 3- komputer pomiarowy, 4- hermetyczne naczynie, 5- układ regulacji i stabilizacji temperatury



Rys.2. Układ elektrod pomiarowych wraz z badaną próbką izolacji

1- wałek wykonany z miedzi (elektroda niskiego potencjału), 2- próbka izolacji aramidowo-olejowej, 3- folia metalowa (elektroda wysokiego potencjału), 4- grzałka, 5- czujnik temperatury, 6- izolator

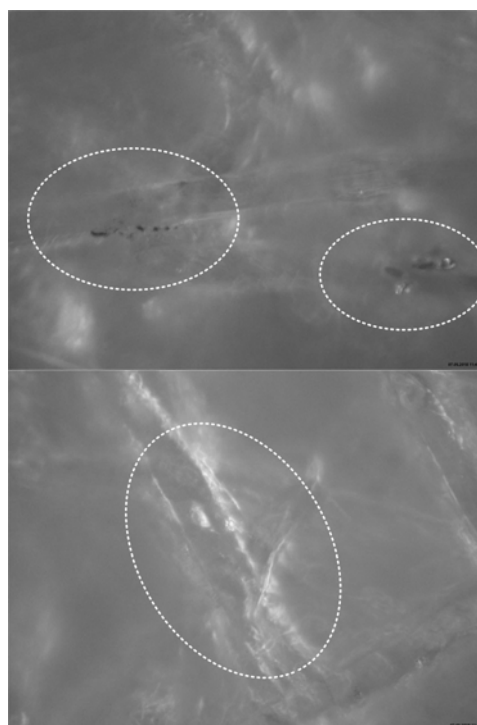


Rys.3. Próбка izolacji przygotowana do badań

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 zestarzenia 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 o ciśnieniu ok. 1 Pa i wygrzewano w 120°C przez 2 h celem ich wysuszenia przed impregnacją.

Do impregnacji próbek wykorzystano dwa estry firmy M&I Materials przeznaczone do pracy pod wysokim napięciem, głównie jako izolacja ciepla stosowana w energetycznych transformatorach mocy. Były to odpowiednio: 1- ester syntetyczny oznaczony jako Midel® 7131 oraz 2- ester naturalny oznaczony jako Midel® eN 1240. Ciecze poddano procesowi suszenia oraz odgazowania pod próżnią w temperaturze 60°C przez okres 24 h. Proces impregnacji wykonano poprzez zanurzenie próbki papieru aramidowego do cieczy i jej sezonowanie pod próżnią w 60°C przez okres 48 h. Ponieważ istotą prowadzonych badań była analiza wpływu termicznej degradacji włókien papieru aramidowego na charakterystyki dyspersyjne współczynnika strat $tg\delta$ oraz pojemności C izolacji impregnowanej, postanowiono dokonać optycznej oceny ww. stopnia degradacji. Rysunek 4 przedstawia zdjęcia z mikroskopu optycznego ukazujące miejsca uszkodzeń powierzchni włókna (obszary zaznaczone linią przerywaną).

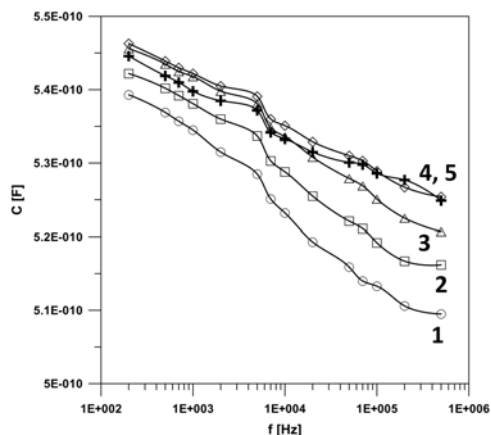


Rys.4. Zdjęcia mikroskopowe powierzchni włókien papieru aramidowego po etapie przyspieszonego starzenia termicznego w 250°C trwającego 400 h

Wyniki badań

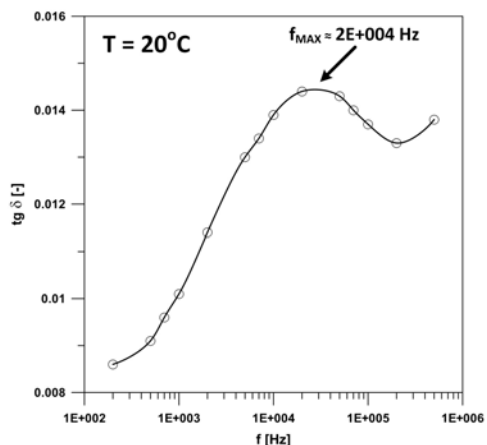
Pierwszym etapem badań była analiza wpływu temperatury na charakterystyki dyspersyjne pojemności C oraz współczynnika strat $tg\delta$ próbek izolacji aramidowo-olejowej. Na rysunku 5 przedstawiono przykładową charakterystykę zmian pojemności dla próbki niestarzonej impregnowanej estrem syntetycznym. Zaobserwowano niemalże proporcjonalny do temperatury niewielki przyrost pojemności, co jest typowe dla izolacji impregnowanej olejami. Podstawową przyczyną jest malejąca wraz z rosnącą temperaturą lepkość estru, co poprawia warunki polaryzacji cieczy. Podobne obserwacje dokonano również dla impregnacji wykonanej estrem naturalnym. Stopień degradacji termicznej włókien papieru aramidowego również praktycznie w niczym nie wpływał na opisywane zjawisko. Analizując charakterystyki dyspersyjne współczynnika strat zauważono natomiast wyraźne maksimum strat dielektrycznych procesu relaksacji grup molekularnych zawartych w papierze lub też w oleju, które

dla temperatury 20°C oraz impregnacji estrem syntetycznym odpowiadało częstotliwości ok. 20 kHz napięcia pomiarowego (rys. 6). Wzrost temperatury wywołał przesuwanie się maksimum w stronę wyższych częstotliwości (rys. 7), niezależnie od rodzaju zastosowanej cieczy impregnującej czy stopnia degradacji termicznej włókien papieru aramidowego.

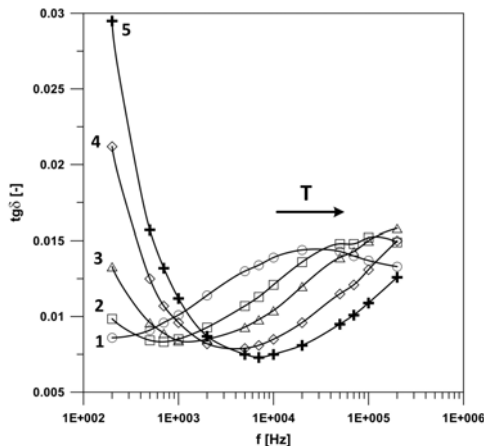


Rys.5. Wpływ temperatury próbek papieru aramidowego niestarzonego impregnowanego estrem syntetycznym na pojemność C

1- 20°C, 2- 40°C, 3- 60°C, 4- 80°C, 5- 100°C



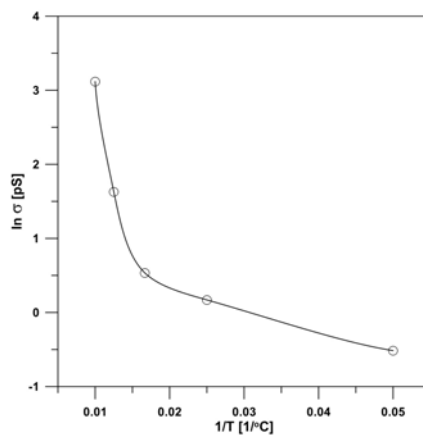
Rys.6. Współczynnik strat $tg\delta$ próbki papieru aramidowego niestarzonego impregnowanego estrem syntetycznym



Rys.7. Wpływ temperatury próbek papieru aramidowego niestarzonego impregnowanego estrem syntetycznym na współczynnik strat $tg\delta$

1- 20°C, 2- 40°C, 3- 60°C, 4- 80°C, 5- 100°C

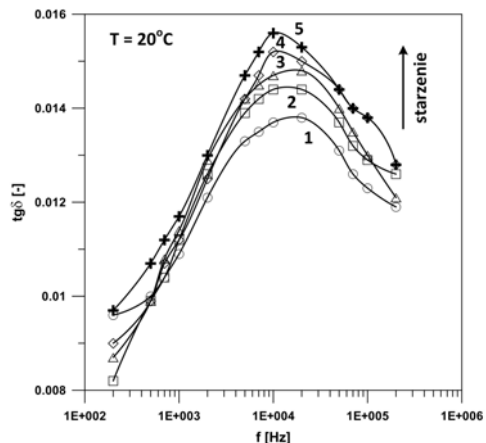
Jest to typowe zjawisko związane ze skracaniem się stałych czasowych relaksacji w miarę wzrostu temperatury. Zauważyć należy, że wzrost temperatury wywołuje również zwiększenie się strat wynikających z prądu upływnościowego, co prezentuje w postaci zależności konduktancji skrośnej mierzonej po upływie 300 s w funkcji temperatury rysunek 8.



Rys.8. Konduktancja skrośna σ próbki papieru aramidowego niestarzonego impregnowanego estrem syntetycznym mierzona po upływie 300 s

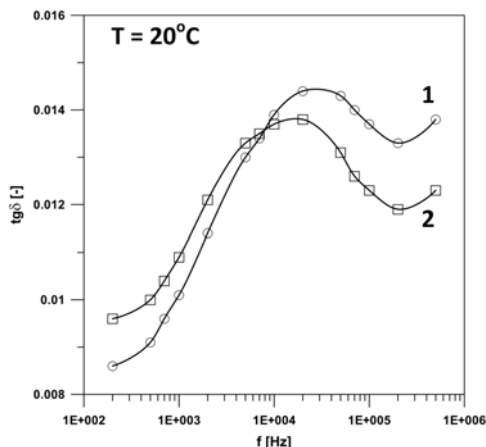
Drugim etapem badań była analiza wpływu stopnia degradacji termicznej włókien papieru aramidowego na charakterystyki dyspersyjne pojemności C oraz współczynnika strat $tg\delta$ próbek izolacji aramidowo-olejowej impregnowanej estrem syntetycznym oraz naturalnym. Niestety, w przypadku pojemności C wpływ starzenia objawił się trudnymi w jednoznacznej interpretacji zmianami, które dla całego obserwowanego zakresu częstotliwości (t.j. od 200 Hz do 200 kHz) oscylowały w zakresie ok. 100 pF, przy średniej pojemności własnej badanych próbek izolacji wynoszącej ok. 550 pF. Za prawdopodobną przyczynę takich zmian można uznać deformowanie się powierzchni papieru aramidowego skutkiem starzenia (marszczenie). Ponieważ wykorzystany w eksperymentach papier aramidowy był bardzo cienki (50 μ m), już niewielkie pęknięcia włókien zmieniają istotnie naprężenia wewnątrz materiału, co objawia się ww. deformacją powierzchni. Tym samym, praktycznie niemożliwe staje się bardzo precyzyjne nawinięcie papieru na elektrodę niskiego potencjału, bez mikrokawern wypełnionych cieczą impregnującą. Wywołuje to w pewnym sensie losowe, niewielkie zmiany pojemności własnej badanych próbek. W przypadku współczynnika strat $tg\delta$ zaobserwowano natomiast powtarzalny, skorelowany z rosnącym stopniem degradacji termicznej włókien aramid, niemalże proporcjonalny wzrost wyżej opisanego maksimum procesu relaksacji papieru aramidowego. Na rysunku 9 przedstawiono przykładową charakterystykę ukazującą opisaną zjawisko dla temperatury próbki wynoszącej 20°C oraz impregnacji wykonanej tym razem z estru naturalnego. Identycznie brzmiący wniosek można sformułować dla impregnacji wykonanej z estru syntetycznego, jeżeli uwzględni się niewielkie przesunięcie na osi częstotliwości, co przedstawia rysunek 10. Z uwagi na posiadaną aparaturę pomiarową ograniczającą zakres prowadzonego eksperymentu do częstotliwości 1 MHz, aby możliwie dokładnie analizować ww. maksimum strat procesu relaksacji, zaleca się wykonywanie pomiarów w temperaturach możliwie niskich, np. 20°C. Przyczyny wzrostu strat procesu relaksacji włókien papieru

aramidowego już nie można tłumaczyć zwiększającym się prądem upływu, który by wynikał z postępującej degradacji termicznej. Rysunek 11 przedstawia rezystancję skrośną mierzoną po upływie 300 s próbek impregnowanych estrem syntetycznym i naturalnym. Spadek wartości rezystancji R_{300} jest niewielki, nie przekracza nawet jednego rzędu zmiany, niezależnie od zastosowanej cieczy impregnującej.



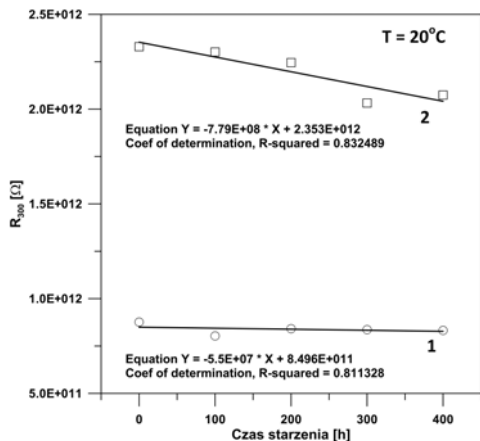
Rys.9. Wpływ czasu starzenia papieru aramidowego impregnowanego estrem naturalnym na współczynnik strat $tg\delta$

1- 0 h, 2- 100 h, 3- 200 h, 4- 300 h, 5- 400 h



Rys.10. Wpływ rodzaju impregnacji próbek papieru aramidowego niestarzonego na współczynnik strat $tg\delta$

1- ester syntetyczny, 2- ester naturalny



Rys.11. Rezystancja R_{300} próbki papieru aramidowego impregnowanego estrem syntetycznym (1) oraz naturalnym (2)

Ostatecznie stwierdzić można, że postępująca degradacja termiczna włókien papieru aramidowego, która objawia się poprzez pęknięcie powierzchni włókna, deformację kształtu, a w skrajnej postaci prowadzi do zlepiania się włókien i wytworzenia losowych nieregularnych struktur materiału, istotnie utrudnia procesy relaksacji dielektrycznej.

Wnioski

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów związanych z analizą charakterystyk dyspersyjnych pojemności C stwierdzono:

- wzrost temperatury w zakresie od 20°C do 100°C wywołuje proporcjonalny nieznaczny wzrost pojemności C (maksymalnie o ok. 5%) niezależnie od rodzaju zastosowanej impregnacji w pełnym zakresie pomiarowym, tj. od 200 Hz do 200 kHz;

- wzrost stopnia zesterzenia papieru aramidowego w zakresie od 0 h do 400 h wygrzewania w 250°C wywołuje trudne w jednoznacznej interpretacji zmiany pojemności C (maksymalnie ok. 20%) niezależnie od rodzaju zastosowanej impregnacji w pełnym zakresie pomiarowym, tj. od 200 Hz do 200 kHz.

W wyniku przeprowadzonych eksperymentów związanych z analizą charakterystyk dyspersyjnych współczynnika strat $tg\delta$ stwierdzono:

- wzrost temperatury (zakres j.w.) wywołuje przesunięcie się maksimum procesu relaksacji (dla 20°C: ester syntetyczny $f_{MAX} \approx 20$ kHz, ester naturalny $f_{MAX} \approx 10$ kHz) w stronę częstotliwości wyższych niezależnie od rodzaju zastosowanej impregnacji;

- wzrost stopnia zesterzenia papieru aramidowego (zakres j.w.) wywołuje wzrost maksimum procesu relaksacji (maksymalnie o ok. 20%) niezależnie od rodzaju zastosowanej impregnacji.

Autor: dr hab. inż. Stefan Wolny, Politechnika Opolska, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76 B2, 45-758 Opole, 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] Rapp K.J., Luksich J., Accelerated aging of aramid insulation in various dielectric liquids, *IEEE 18th Intern. Conf. on Dielectric Liquids (ICDL)*, Bled, Slovenia, June 29-July 3 (2014)
- [3] Wolny S., Lepich M., Influence of ageing and moisture degree of aramid-oil insulation on depolarization current, *IEEE Intern. Conf. on Dielectrics (ICD)*, Montpellier, France, 3-7 July (2016), 1163-1166
- [4] Tang C., Li X., Yin F., Hao J., The performance improvement of aramid insulation paper by nano-SiO₂ modification, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 24 (2017), Issue 4, 2400-2409
- [5] 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
- [6] Zdanowski M., Streaming Electrification of Mineral Insulating Oil and Synthetic Ester MIDEL 7131, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 21 (2014), Issue 3, 1127-1132
- [7] Kang B.S., Levit M.R., Marek R.P., Wicks R.C., Provost R.L., Development of a new solid insulation for liquid-immersed transformers, *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Philadelphia, USA, 8-11 June (2014), 344-347