

Charakterystyki dyspersyjne zespolonej przenikalności elektrycznej papierów aramidowych NOMEX® T410 oraz T910 impregnowanych różnymi cieczami dielektrycznymi

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zespolonej przenikalności elektrycznej w dziedzinie wysokiej częstotliwości, przeprowadzone na próbkach izolacji impregnowanej. Warstwę izolacji stałej wykonano z dwóch rodzajów papierów elektrotechnicznych: w pełni aramidowego typu NOMEX® T410 oraz z celulozowo-aramidowego typu NOMEX® T910. Jako impregnat wykorzystano trzy rodzaje cieczy dielektrycznej: olej mineralny Nynas Nytro 10X, ester syntetyczny Midel 7131 oraz ester naturalny Midel en1204. Celem badań była obserwacja oraz analiza zmian właściwości dielektrycznych tych materiałów. W badaniach uwzględniono wpływ oddziaływania temperatury w zakresie od 20°C do 100°C, co odpowiada typowym warunkom eksploatacji izolacji impregnowanej w transformatorach mocy.

Abstract. The article presents the results of experimental research on complex electric permittivity in the high frequency domain, carried out on impregnated insulation samples. The solid insulation layer was made of two types of electrotechnical papers: NOMEX® T410 fully aramid type and NOMEX® T910 cellulose-aramid type. As impregnation, three types of dielectric liquid were used: mineral oil Nynas Nytro 10X, synthetic ester Midel 7131 and natural ester Midel en1204. The purpose of the research was to observe and analyze changes in the dielectric properties of these materials. The studies took into account the impact of temperature in the range from 20°C to 100°C, which corresponds to the typical conditions of exploitation of impregnated insulation in power transformers. (*Dispersive characteristics of the complex permittivity of aramid papers NOMEX® T410 and T910 impregnated with various dielectric liquids*).

Słowa kluczowe: izolacja aramidowo-olejowa, spektroskopia dielektryczna, charakterystyki dyspersyjne, przenikalność elektryczna.

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

Wstęp

Izolacja celulozowa impregnowana cieczami izolacyjnymi, w tym głównie mineralnym olejem izolacyjnym, stosowana jest w konstrukcjach transformatorów energetycznych mocy od ponad stu lat. Aktualna sytuacja prawno-ekonomiczna w Polsce i na świecie, praktycznie zmusza właścicieli tych urządzeń do poszukiwania dostępnych na rynku rozwiązań ograniczających koszty eksploatacji oraz ryzyka związane z ewentualną awarią i powiązanych z tym szkodami dla środowiska. Dlatego producenci materiałów elektroizolacyjnych, które wykorzystywane są w transformatorach elektroenergetycznych, we współpracy z ośrodkami naukowymi ciągle poszukują nowych rozwiązań, doskonalszych pod względem parametrów elektrycznych i fizyko-chemicznych, mając oczywiście na uwadze aspekt ekonomiczny. Obecnie, duże nadzieje pokłada się w izolacji stałej wytworzonej z materiału syntetycznego na bazie włókna aramidowego, impregnowanej przyjaznymi dla środowiska syntetycznymi bądź naturalnymi estrami [1-4]. W porównaniu z celulozą, wykorzystanie włókna aramidowego powoduje znaczny wzrost odporności na wysokie temperatury, która obecnie jest głównym czynnikiem wpływającym na przedwczesne starzenie się izolacji w transformatorach [1, 3-5]. Jednakże, przy projektowaniu układów izolacyjnych typu aramid-ester, zwłaszcza w układach z wymuszonym przepływem cieczy, należy rozważyć dużą podatność materiału na zjawisko elektryzacji strumieniowej [6]. Drugą przeszkodą w upowszechnieniu się izolacji wykonanej z papierów aramidowych jest koszt samego materiału, kilkakrotnie wyższy od papierów celulozowych w przeliczeniu na kilogram masy, jednak w postaci izolacji zwojowej impregnowanej estrem syntetycznym ostatecznie zwiększający koszt transformatora o ok. 30% [3]. Pewnym kompromisem jest nowy półsyntetyczny materiał NOMEX® T910, który wytwarzany jest z ulepszonej cieplnie celulozy wzmocnionej wysokotemperaturowym polimerem meta-aramidowym [3, 7]. Materiał ten w porównaniu do papierów celulozowych cechuje przede wszystkim zwiększona klasa temperaturowa, tzn. z klasy 110°C do 130°C oraz

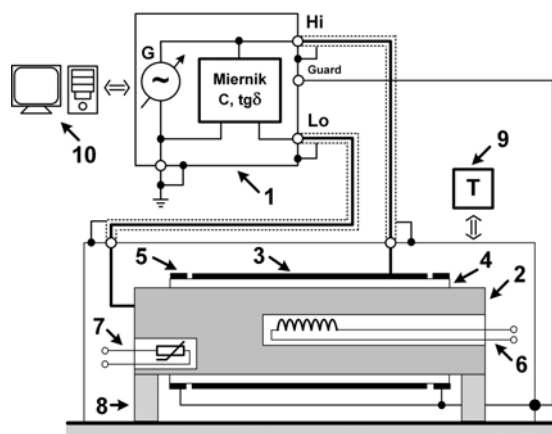
podniesienie o ok. 30% wytrzymałość na przebicie [3, 7]. Ponadto, ponieważ papier NOMEX® T910 pokryty jest obustronnie cienką warstwą aramid, wraz z procesem degradacji termicznej celulozy oraz wynikającą z tego utratą jej własności mechanicznych, będzie podczas eksploatacji utrzymywał całkowitą wytrzymałość mechaniczną materiału na akceptowalnym poziomie. Tym samym, oczekuje się odpowiedniego wydłużenia czasu życia technicznego transformatora z tym typem izolacji.

W artykule zaprezentowano wyniki badań porównawczych próbek papieru w pełni aramidowego NOMEX® T410 oraz celulozowo-aramidowego NOMEX® T910 w postaci charakterystyk zespolonej przenikalności elektrycznej mierzonej w dziedzinie wysokich częstotliwości. Uwzględniono przy tym również wpływ trzech rodzajów cieczy impregnujących, tzn. oleju mineralnego, estru syntetycznego oraz naturalnego. Badania przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych w zakresie temperatur izolacji od 20°C do 100°C, co odpowiada warunkom praktycznej eksploatacji ww. materiałów. Zakres wysokich częstotliwości dobrano na podstawie wcześniejszych badań próbek izolacji w pełni aramidowej [4, 8].

Sposób przygotowania próbek

Próbki izolacji wykonano z transformatorowego papieru aramidowego Nomex® T410 o grubości 50 µm oraz celulozowo-aramidowego Nomex® T910 o grubości 80 µm. Izolację pocięto w paski o wymiarach 1300 mm x 120 mm. Następnie, jeszcze przed impregnacją, próbki umieszczono w próżni i wygrzewano w 100°C przez 2 h celem ich wysuszenia. Do impregnacji próbek wykorzystano trzy rodzaje cieczy: inhibitowany mineralny olej izolacyjny firmy Nynas Nytro 10 X, syntetyczny ester firmy M&I Materials Midel 7131 oraz naturalny ester firmy M&I Materials Midel eN 1204. 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 min. 10 warstw izolacji. Elektrodę wysokiego potencjału wykonano z cienkiej folii aluminiowej o szerokości 80 mm. Folię

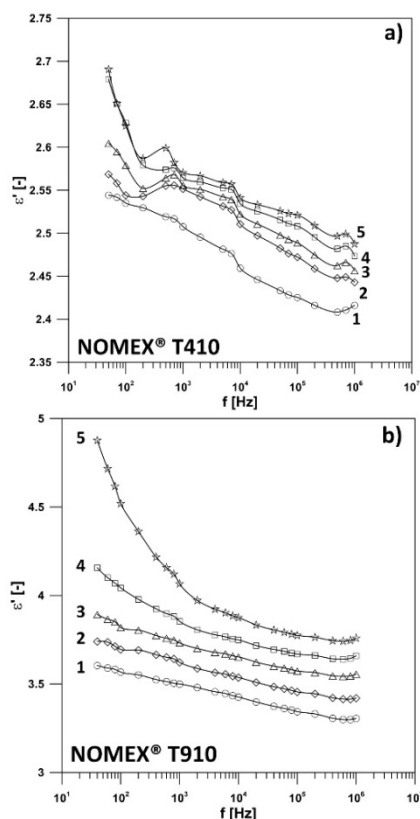
nawinięto na wałek z próbką. Rysunek 1 przedstawia układ gotowy do badań. Badania przeprowadzono w hermetycznej komorze wyposażonej w układ regulacji i stabilizacji temperatury.



Rys.1. Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk dyspersyjnych zespolonej przenikalności elektrycznej badanych próbek izolacji: 1 – miernik Gw INSTEK LCR-8101, 2 – elektroda niskiego potencjału, 3 – elektroda wysokiego potencjału, 4 – próbka badanej izolacji, 5 – elektrody ekranujące, 6 – grzałka, 7 – czujnik temperatury, 8 – izolatory teflonowe, 9 – układ kontroli i stabilizacji temperatury, 10 – komputer

Wyniki badań

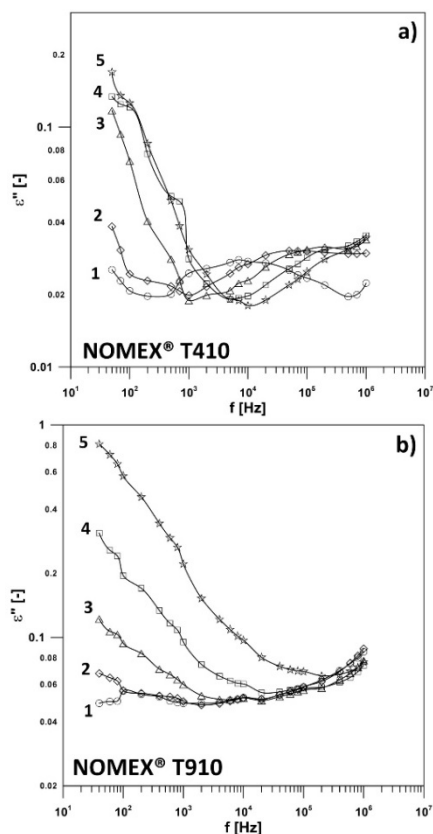
Pomiary współczynnika stratności $tg\delta$ oraz pojemności C próbek przeprowadzono wykorzystując mostek RLC firmy GwINSTEK typu LCR-8101 w zakresie częstotliwości napięcia pomiarowego od 50 Hz do 1 MHz.



Rys.2. Wpływ temperatury na charakterystyki dyspersyjne części rzeczywistej zespolonej przenikalności elektrycznej próbek izolacji impregnowanej olejem mineralnym: 1 – 20°C, 2 – 40°C, 3 – 60°C, 4 – 80°C, 5 – 100°C

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 próbek izolacji na część rzeczywistą ϵ' dla obu badanych papierów impregnowanych mineralnym olejem izolacyjnym.

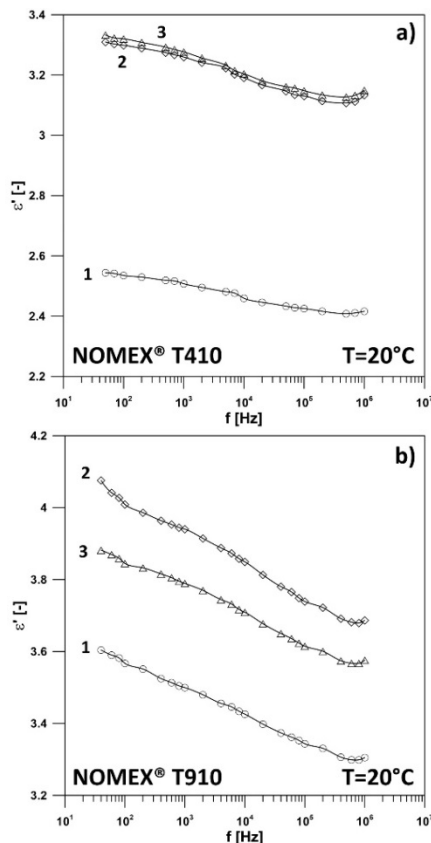
W przypadku papieru w pełni aramidowego (rys.2a) zaobserwować można praktycznie proporcjonalny wzrost wartości przenikalności ϵ' wraz z temperaturą w całym zakresie obserwowanych częstotliwości. Podobna sytuacja występuje dla papieru celulozowo-aramidowego (rys.2b), przy czym wzrost ten jest zdecydowanie większy w ujęciu procentowym, tzn. odpowiednio dla papieru aramidowego wynosi ok. 6% maksymalnego wzrostu ϵ' , natomiast dla papieru celulozowo-aramidowego ok. 30%. Ponadto charakterystyki na rysunku 2b w żadnym punkcie nie przecinają się co sugeruje, że materiał ten prawdopodobnie lepiej nasycy się cieczą dielektryczną, wchłaniając również w procesie impregnacji większą jej objętość. Dominująca w strukturze materiału celuloza upodabnia charakterystyki ϵ' do izolacji impregnowanej wykonanej z czystej celulozy. Obserwacja ta pozwala przypuszczać, że ewentualna wymiana zużytej nawojowej izolacji celulozowej w transformatorze podczas jego remontu na izolację celulozowo-aramidową, nie wprowadziłaby znaczącej zmiany w mechanizmach polaryzacji, np. dla częstotliwości sieciowej. Podobnie brzmiące wnioski wysunięto dla pozostałych cieczy impregnujących, tzn. dla estru syntetycznego i naturalnego.



Rys.3. Współczynnik strat $tg\delta$ próbki papieru aramidowego niestarzonego impregnowanego estrem syntetycznym: 1 – 20°C, 2 – 40°C, 3 – 60°C, 4 – 80°C, 5 – 100°C

Rysunek 3 przedstawia wpływ temperatury próbek izolacji na część urojoną ϵ'' dla obu badanych papierów impregnowanych analogicznie jak poprzednio, mineralnym olejem izolacyjnym.

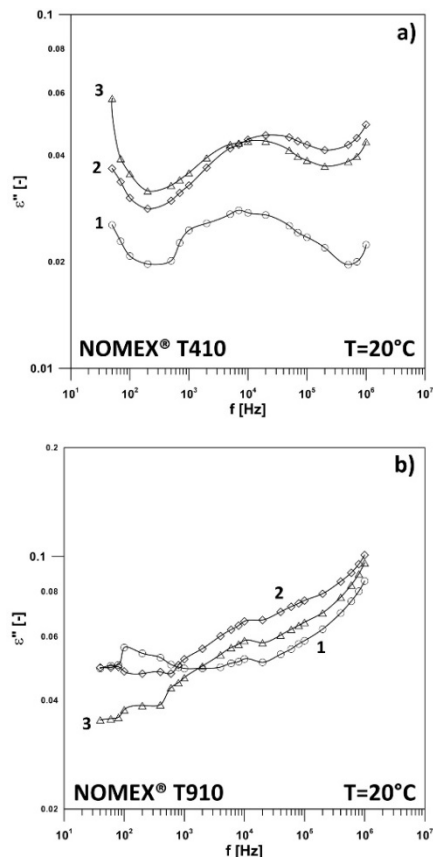
Dla papieru w pełni aramidowego (rys.3a) odnotowano wyraźne maksimum przenikalności w temperaturze 20°C przy częstotliwości ok. 10 kHz. Ponadto wraz ze wzrostem temperatury zaobserwowane maksimum przemieszcza się w stronę częstotliwości wyższych. Opisywane maksimum procesu relaksacji jest charakterystyczne dla suchego papieru aramidowego [9] co sugeruje, że ilość wchłoniętej przez materiał cieczy dielektrycznej jest raczej niewielka. Oczywiście polarność mineralnego oleju izolacyjnego jest również niska, jednak maksimum relaksacji aramidu jest nadal bardzo wyraźne przy pozostałych cieczach impregnujących, których względna przenikalność elektryczna ϵ_r przekracza wartość 3 (rys.5a). W przypadku papieru celulozowo-aramidowego (rys.3b) można dla przenikalności ϵ'' sformułować podobnie brzmiący wniosek jak dla przenikalności ϵ' . Wpływ obustronnego pokrycia papieru celulozowego cienką warstwą aramid, w sposób minimalny wpływa na charakterystyki dyspersyjne przenikalności ϵ'' , upodabniając je do charakterystyk izolacji wytworzonej z czystej celulozy impregnowanej olejem mineralnym. Identyczne wnioski wysunięto dla pozostałych cieczy impregnujących, tzn. syntetycznego i naturalnego estru.



Rys.4. Wpływ rodzaju cieczy impregnującej na charakterystyki dyspersyjne części rzeczywistej zespolonej przenikalności elektrycznej próbek izolacji: 1 – olej mineralny Nytro 10X, 2 – ester syntetyczny Midel 7131, 3 – ester naturalny Midel en 1204

Rysunek 4 przedstawia wpływ rodzaju cieczy impregnującej próbki izolacji na charakterystyki dyspersyjne części rzeczywistej ϵ' zespolonej przenikalności elektrycznej dla wybranej temperatury 20°C. W przypadku papieru w pełni aramidowego (rys.4a) zaobserwowano znaczący wzrost wartości ϵ' izolacji impregnowanej estrem syntetycznym bądź naturalnym w odniesieniu do impregnacji wykonanej z wykorzystaniem oleju mineralnego. Prawdopodobną przyczynę takiej sytuacji upatrywać można w większej przenikalności względnej ϵ_r

w cieczy. Bardziej interesujące wnioski nasuwają się po analizie przenikalności ϵ' papieru celulozowo-aramidowego impregnowanego trzema rodzajami cieczy (rys.4b). Charakterystyki są wyraźnie odseparowane od siebie, co sugeruje dobrą i znaczącą wchłaniania cieczy impregnującej, zapewne przez warstwę celulozową. Różnice wynikają, podobnie jak poprzednio, z wartości przenikalności względnej ϵ_r cieczy. Jednak, ponieważ ester syntetyczny ma mniejszą lepkość w danej temperaturze od estru naturalnego, prawdopodobnie lepiej nasycza badaną próbkę izolacji, skąd wynika obserwowana różnica pomiędzy cieczą 2 i 3 na rysunku 4b.



Rys.5. Wpływ rodzaju cieczy impregnującej na charakterystyki dyspersyjne części urojonej zespolonej przenikalności elektrycznej próbek izolacji: 1 – olej mineralny Nytro 10X, 2 – ester syntetyczny Midel 7131, 3 – ester naturalny Midel en 1204

Rysunek 5 przedstawia wpływ rodzaju cieczy impregnującej próbki izolacji na charakterystyki dyspersyjne części urojonej ϵ'' zespolonej przenikalności elektrycznej dla wybranej temperatury 20°C. W przypadku papieru w pełni aramidowego (rys.5a) zaobserwowano opisywane już wcześniej, charakterystyczne dla aramidu maksimum procesu relaksacji, występujące niezależnie od zastosowanej cieczy impregnującej. Podobnie jak poprzednio, zwiększona polarność estrów w stosunku do oleju mineralnego, zwiększa również stratność dielektryczną próbki w całym zakresie obserwowanych częstotliwości. Dla papieru celulozowo-aramidowego (rys.5b), z uwagi na objętościowo niewielki udział materiału aramidowego w strukturze próbki, charakterystyczne maksimum procesu relaksacji jest ledwo widoczne, z uwagi na maskujące oddziaływanie pozostałych procesów relaksacji zachodzących w impregnowanej celulozie. Charakterystyki są zbliżone do siebie, a w zakresie niższych częstotliwości wykres dla próbki impregnowanej olejem mineralnym nawet przecina pozostałe.

Prawdopodobną przyczyną mogą być zjawiska związane z polaryzacją ładunku przestrzennego na granicy różnych ośrodków, co ujawnia się pod postacią lokalnego maksimum.

Wnioski

Prezentowane w artykule wyniki badań porównawczych papieru aramidowego NOMEX® T410 z celulozowo-aramidowym NOMEX® T910 uwidaczniają bardzo istotne zmiany w mechanizmach polaryzacji jakie zachodzą w badanych próbkach, praktycznie niezależnie od zastosowanej temperatury pomiaru oraz cieczy dielektrycznej wykorzystanej jako impregnat. Charakterystyki papieru celulozowo-aramidowego praktycznie upodabniają się materiałów wykonanych jedynie na bazie celulozy. Zdaniem autora jest to zjawisko korzystne, szczególnie w sytuacji podejmowania decyzji o ewentualnej zmianie izolacji zwojowej remontowanego transformatora energetycznego na celulozowo-aramidową, podczas gdy transformator był pierwotnie projektowany na izolację celulozową. Otwartą kwestią pozostaje jednak migracją wody z takiego materiału do cieczy, która powstaje w wyniku procesów starzeniowych celulozy. Jak długo będzie ustalała się równowaga hydrodynamiczna pomiędzy tymi środowiskami, na przykład w sytuacji wymiany cieczy dielektrycznej w transformatorze bądź znacznych zmian temperatury uzwojeń? Ponadto, czy stosowane dotychczas polaryzacyjne metody diagnostyczne [1, 2, 4, 8, 10] szacujące stopień zawilgocenia izolacji transformatora, mogą być łatwo adaptowane do nowego typu izolacji? Niewątpliwie ww. pytania będą przedmiotem kolejnych badań wielu ośrodków naukowych, w tym i autora artykułu.

Prezentowane wyniki w artykule traktować należy jedynie jako wstępne, wskazujące na możliwość wykorzystania zakresu wysokich częstotliwości do analizy zmian mechanizmów polaryzacji 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. Jednakże, ponieważ wysokie napięcie w zakresie średnich częstotliwości występuje w transformatorach specjalnych, które pracują np. w energetycznych systemach przekształtników napięcia, praktyczne zapotrzebowanie na prowadzenie tego typu badań rośnie [9].

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.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Zenker M., Wpływ temperatury na odpowiedź dielektryczną w dziedzinie częstotliwości papieru aramidowego impregnowanego estrem syntetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 7 (2018), 112-115
- [2] Zenker M., Mroziak A., Odpowiedź dielektryczna papieru aramidowego impregnowanego estrem syntetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10 (2018), 164-167
- [3] Szewczyk R., Papier izolacyjny wzmocniony aramidem – właściwości i zastosowania, *Urządzenia dla Energetyki*, 2 (2019), 47-54
- [4] Wolny S., Analysis of High-frequency Dispersion Characteristics of Capacitance and Loss Factor of Aramid Paper Impregnated with Various Dielectric Liquids, *MDPI Energies*, 12, 1063 (2019), <https://doi.org/10.3390/en12061063>
- [5] Przybyłek P., A comparison of bubble evolution temperature in aramid and cellulose paper, *IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, Bologna, Italy (2013), 983-986
- [6] Zdanowski M., Streaming Electrification of Mineral Insulating Oil and Synthetic Ester MIDEI 7131, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 21 (2014), Issue 3, 1127-1132
- [7] Marek R.P., Wicks R.C., Galhardo L., Szewczyk R., New cellulose paper enhanced with aramid - practical example of material thermal evaluation acc. to IEEE Std C57.100-2011, *SCD1 Colloquium Trends in Technology, Materials, Testing and Diagnostics Applied to Electric Power Systems*, Philadelphia, Rio de Janeiro, Brazil (2015)
- [8] Wolny S., Lepich M., Influence of ageing and moisture degree of aramid-oil insulation on depolarization current, *IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, Montpellier, France (2016), 1163-1166
- [10] Semenov I., Leu C., Loss factor and permittivity measurement at medium-frequency high voltage with an HVDC offset, *13th International Electrical Insulation Conference (INSUCON)*, Birmingham, UK (2017), 200-203
- [11] Wolny S., Analiza charakterystyk dyspersyjnych papieru aramidowego impregnowanego estrem naturalnym i syntetycznym w dziedzinie wysokich częstotliwości, *Przegląd Elektrotechniczny*, 10 (2018), 168-171