

Dopuszczalna temperatura pracy wysokotemperaturowych układów izolacyjnych w aspekcie zagrożenia wystąpieniem zjawiska bąbelkowania

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w wysokotemperaturowych układach izolacyjnych transformatorów energetycznych. Do badań wykorzystano papier aramidowo-celulozowy Nomex[®] 910 oraz papier aramidowy Nomex[®] 926. Badane próbki zanurzono w oleju mineralnym i estrze syntetycznym Midel 7131. Wyniki badań wskazują, że w układach izolacyjnych eksploatowanych zgodnie z normą IEC 60076-14 może zaistnieć zjawisko bąbelkowania.

Abstract. The article presents the results of research on bubble effect initiation temperature in high-temperature insulation systems of power transformers. Nomex[®] 910 aramid-cellulose paper and Nomex[®] 926 aramid paper were used for the tests. The tested samples were immersed in mineral oil and Midel 7131 synthetic ester. The test results indicate that in insulating systems operated in accordance with the IEC 60076-14 standard bubble effect may occur. (Permissible operating temperature of high-temperature insulation systems in terms of the risk of occurrence bubble effect).

Słowa kluczowe: zjawisko bąbelkowania, wysokotemperaturowa izolacja transformatorów energetycznych, Nomex[®] 910, Nomex[®] 926, ester syntetyczny Midel 7131.

Keywords: bubble effect, high-temperature insulation of power transformers, Nomex[®] 910, Nomex[®] 926, Midel 7131 synthetic ester.

Wstęp

Transformatory energetyczne należą do jednych z kluczowych i najdroższych elementów systemu energetycznego. Ich awaria skutkuje przerwą w dostawie energii elektrycznej do odbiorców końcowych, a często także wysokim kosztem naprawy, co wynika z wysokiej ceny transformatorów [1].

Prewencyjna diagnostyka transformatorów pozwala istotnie zmniejszyć ryzyko wystąpienia ich awarii. Znajomość zjawisk fizycznych, które mogą doprowadzić do uszkodzenia transformatora lub jego układu izolacyjnego jest więc bardzo ważna i ułatwia skuteczną diagnostykę. Dotyczy to między innymi wyładowań niezupełnych [2], przepięć piorunowych [3] czy zjawiska bąbelkowania [4].

Jednym z kluczowych parametrów wpływającym na czas życia układu izolacyjnego, a co za tym idzie, całego transformatora, jest stopień zawilgocenia izolacji uzwojeń i przegród. Jest to niezwykle istotne w aspekcie zagrożenia wystąpienia zjawiska bąbelkowania (ang. *bubble effect*, b.e.).

Pewna zawartość wilgoci w układach izolacyjnych transformatorów jest nieodzowna, ponieważ zapewnia elastyczność papieru izolującego uzwojenia. Zagrożenie powstaje dopiero jej nadmiar.

Poziom zawilgocenie izolacji wynika z trzech głównych czynników: zawilgocenia początkowego, pozostałego po procesie suszenia części aktywnej w fabryce, nieszczelności kadzi i konserwatora oraz rozkładu chemicznego celulozy [5]. Ten ostatni w prawidłowo eksploatowanej jednostce jest dominujący. Materiały wysokotemperaturowe, które są wykonane na bazie aramidu, nie generują w procesie swojego rozkładu wody. Jest to ich oczywista zaleta. Jednak aktualnie budowane transformatory coraz częściej mają hybrydowe układy izolacyjne, które zawierają zarówno materiały wysokotemperaturowe jak i celulozowe. W takich układach izolacyjnych powstaje więc woda, będąca skutkiem rozkładu łańcuchów celulozowych.

W artykule przedstawiono wyniki badań temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania wysokotemperaturowej izolacji Nomex[®] 910 oraz Nomex[®] 926 zanurzonych w oleju mineralnym Orlen Trafo eN oraz w estrze syntetycznym

Midel 7131 i odniesiono je do dopuszczalnej normatywnej temperatury pracy tych układów izolacyjnych [6].

Zjawisko bąbelkowania

Zjawisko bąbelkowania definiuje się jako gwałtowne uwalnianie pary wodnej z zawilgoconej izolacji stałej transformatora, które zachodzi po przekroczeniu temperatury krytycznej, zwanej temperaturą inicjacji [7].

Zainicjowanie zjawiska bąbelkowania w klasycznych układach izolacyjnych (celuloza-olej mineralny) jest zależne, przede wszystkim, od dwóch czynników: zawilgocenia izolacji oraz jej temperatury [8]. Ponadto, na temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania mają pewien wpływ takie czynniki jak: obecność gazów rozpuszczonych w oleju, stopień polimeryzacji celulozy czy stopień zesterzenia oleju mineralnego [9, 10].

Pojawienie się zjawiska bąbelkowania jest groźne dla układu izolacyjnego, gdyż w miejscu, w którym wystąpi, powoduje pogorszenie parametrów elektrycznych izolacji. Badania dowodzą, że np. napięcie przebicia układu izolacyjnego w przypadku pojawienia się tego zjawiska może obniżyć się nawet o 60% [11].

W klasycznych układach izolacyjnych podwyższenie temperatury izolacji do wartości, przy której może zainicjować się zjawisko bąbelkowania, może być spowodowane między innymi: krótko- lub długotrwałym przeciążeniem transformatora, zablokowaniem kanału chłodzącego uzwojenie czy wręcz awarią układu chłodzenia.

Problematyka zjawiska bąbelkowania w stosunkowo nowych, wysokotemperaturowych układach izolacyjnych, wymaga jeszcze badań, a niniejszy artykuł stanowi wkład w wiedzę na jego temat.

Materiały izolacyjne na bazie aramidu

Materiały wysokotemperaturowe charakteryzują się podwyższoną temperaturą pracy w porównaniu do klasycznej izolacji celulozowej. Zwiększenie odporności termicznej materiałów izolacyjnych używanych w transformatorach ma szereg zalet [12, 13]:

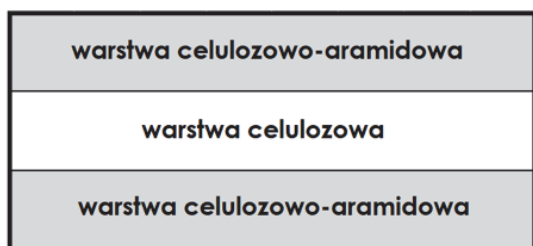
- wydłuża żywotność izolacji,
- zwiększa możliwość przeciążania transformatora,

- w niektórych przypadkach pozwala na zoptymalizowanie budowy części aktywnej transformatora.

Do jednych z najczęściej stosowanych wysokotemperaturowych materiałów izolacyjnych zalicza się materiały zbudowane z włókien aramidowych. Wśród nich można wyróżnić dwa powszechnie używane: Nomex[®] 926 oraz Nomex[®] 910.

Nomex[®] 926 jest materiałem składającym się z czystego aramidu. Dostępny jest w postaci rolki o grubości 0,05 mm [14]. Natomiast Nomex[®] 910 to nowoczesna wysokotemperaturowa izolacja, składająca się zarówno z włókien aramidowych jak celulozowych (Rys. 1), dzięki czemu materiał ten jest bardziej przystępny cenowo, a jego parametry plasują się pomiędzy celulozą a aramidem [15].

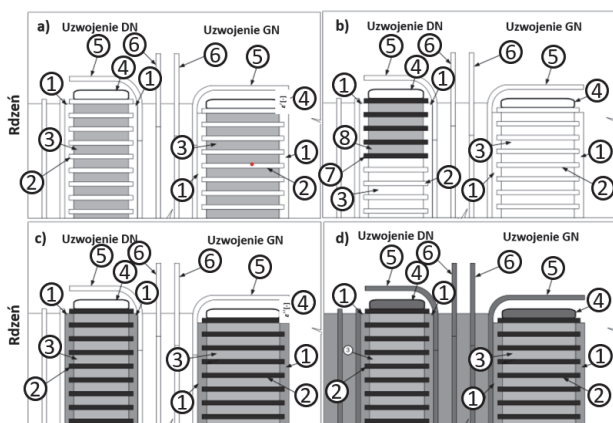
Zastosowanie wysokotemperaturowej izolacji w każdym miejscu układu izolacyjnego transformatora jest bardzo kosztowne. Z tego powodu częściej spotyka się układy hybrydowe, w których izolację wysokotemperaturową wykorzystuje się w miejscach najbardziej narażonych na oddziaływanie wysokiej temperatury, zazwyczaj w tak zwanych gorących punktach uzwojeń (ang. *Hot-spot*).



Rys.1. Przekrój poprzeczny materiału Nomex[®] 910

Wysokotemperaturowe układy izolacyjne przedstawione w normie IEC 60076-14

Norma europejska [6] wyróżnia pięć rodzajów układów izolacyjnych: konwencjonalny, półhybrydowy, mieszany hybrydowy, pełny hybrydowy oraz wysokotemperaturowy. Na rysunku 2 przedstawiono przykłady hybrydowych oraz wysokotemperaturowych układów izolacyjnych. Na szaro oraz na czarno zaznaczono materiały wysokotemperaturowe, natomiast na biało zaznaczono materiały konwencjonalne.



Rys.2. Przykłady układów izolacyjnych: a) półhybrydowy, b) mieszany hybrydowy, c) pełny hybrydowy, d) wysokotemperaturowy; 1 – wstawki osiowe, 2 – wstawki promieniowe, 3 – izolacja drutu nawojowego, 4 – pierścienie ekwipotencjalne, 5 – izolacja kątowna, 6 – bariery [na podstawie 6]

Porównanie właściwości oleju mineralnego i estru syntetycznego Midel 7131

W artykule przedstawiono wyniki badań temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiałach izolacyjnych na bazie aramidu zanurzonych w dwóch cieczach: oleju mineralnym Orlen Trafo eN oraz estrze syntetycznym Midel 7131, który z powodu wysokiej temperatury zapłonu par jest zaliczany do izolacji wysokotemperaturowej. Tablica 2 przedstawia porównanie podstawowych parametrów tych cieczy.

Tablica 1. Podstawowe parametry oleju mineralnego Orlen Trafo eN i estru syntetycznego Midel 7131 [16, 17, 18]

Parametr	Olej mineralny Orlen Trafo eN	Ester syntetyczny Midel 7131
Gęstość w 20°C [kg/m ³]	870	970
Lepkość kinematyczna w 40°C [m ² /s]	9,9·10 ⁻⁶	29,5·10 ⁻⁶
Temperatura płynięcia [°C]	-51	-60
Temperatura zapłonu par [°C]	146	260
Biodegradowalność [%]	10	89
Napięcie przebicia [kV]	60	75
Współczynnik strat dielektrycznych w 90°C [-]	0,0015	0,0080

Z przedstawionych danych wynika, że obie ciecze mają zbliżone parametry elektryczne, ale wyraźnie różnią się temperaturą zapłonu par oraz biodegradowalnością – na korzyść estru syntetycznego. Niestety, dużo większa lepkość tego estru może sprawiać problemy w skutecznym chłodzeniu transformatora, w którym zostanie on zastosowany.

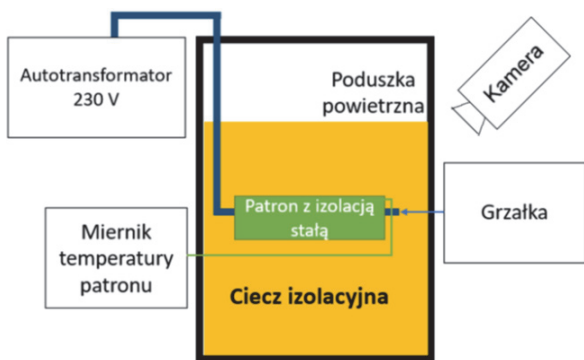
Badania i odniesienie ich wyników do dopuszczalnej temperatury pracy wysokotemperaturowych układów izolacyjnych

Badaniom poddano materiały stałe: Nomex[®] 910, w postaci papieru o grubości 0,080 mm i szerokości 100 mm, oraz Nomex[®] 926, w postaci papieru o grubości 0,050 mm i szerokości 100 mm. Próbkę różniły się grubością, dlatego w celu badania tej samej objętości materiału, tak dobierano długość jego wstęgi nawijanej na aluminiowy walek grzewczy (patron), aby ich całkowita grubość wynosiła 1,15 mm. Materiały stałe były zanurzane w dwóch cieczach elektroizolacyjnych: oleju mineralnym Orlen Trafo eN oraz estrze syntetycznym Midel 7131.

Próbki, przed zanurzeniem w cieczy, były wysuszone w komorze próżniowej i zawilgocone w komorze klimatycznej w taki sposób, aby miały żądane zawilgoconie, w zakresie od ok. 0,5% do ok. 6%.

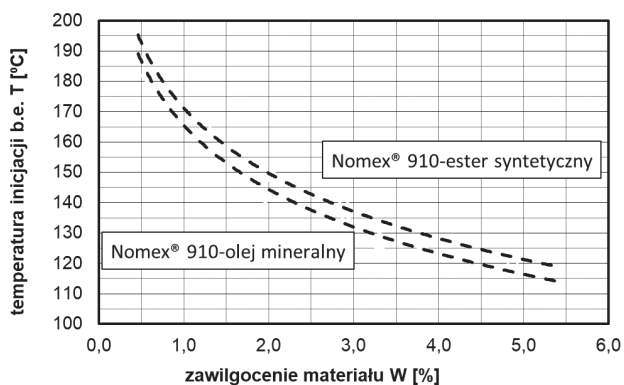
Schemat układu badawczego przedstawia rysunek 3. Aluminiowy patron był ciasno nasuwany na grzałkę palcową, której temperatura była regulowana przez autotransformator. W połowie długości patronu była umieszczona termopara podłączona do miernika temperatury CENTER 309. Każdorazowo, badane próbki izolacji stałej zanurzano w 2,5 l odgazowanej cieczy, znajdującej się w szklanym naczyniu pomiarowym o wymiarach 295x180x62 mm, i kondycjonowano przez 10 min. Następnie włączano grzałkę i rejestrowano temperaturę patronu. Tempo wzrostu jego temperatury było za każdym razem takie samo i wynosiło ok. 1°C/s na początku eksperymentu, a blisko spodziewanej temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania tempo to zmniejszono do ok. 0,1°C/s. Umożliwiło to dokładne wyznaczenie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania bez konieczności uwzględniania przy tym bezwładności cieplnej układu patron-próbka izolacji (W takich warunkach

temperatura patronu podczas inicjacji zjawiska bąbelkowania może być traktowana jako temperatura badanej izolacji stałej nawiniętej na ten patron).

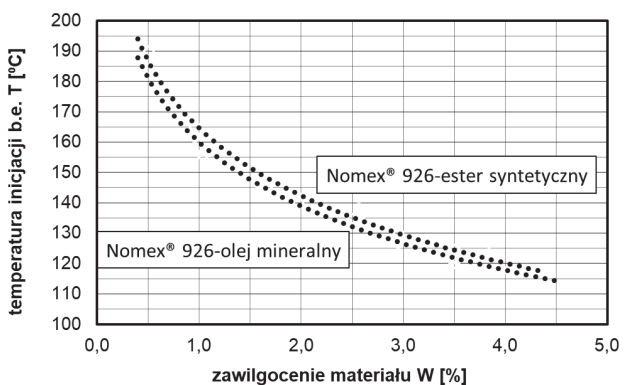


Rys.3. Schemat układu do badania temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania.

Wyniki pomiarów zostały przedstawione w formie charakterystyk zależności temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania badanego materiału stałego zanurzonego w danej cieczy od jego zawilgocenia (Rys. 4 i 5). Punkty pomiarowe, w liczbie kilkunastu na przebieg, zostały pominięte w celu niezaciemniania tych przebiegów.



Rys.4. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania próbek materiału Nomex® 910 zanurzonych w oleju mineralnym Orlen Trafo eN oraz estrze syntetycznym Midel 7131



Rys.5. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania próbek materiału Nomex® 926 zanurzonych w oleju mineralnym Orlen Trafo eN oraz estrze syntetycznym Midel 7131

Uzyskane dane pomiarowe zostały dodatkowo opisane najlepiej dopasowanymi do nich liniami trendu o wysokim współczynniku determinacji R^2 , co świadczy o bardzo dobrym dopasowaniu krzywych do uzyskanych punktów pomiarowych (Tab. 2). Równania pozwalają w prosty

sposób wyznaczyć temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania w badanych układach izolacyjnych, co może być wykorzystywane w praktyce eksploatacyjnej.

Tab.2. Równania opisujące uzyskane rozkłady temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w zależności od zawilgocenia izolacji stałej Nomex® 910 oraz Nomex® 926, zanurzonych w oleju mineralnym Orlen Trafo eN oraz estrze syntetycznym Midel 7131

Izolacja stała	Ciecz izolacyjna	$T_{\text{inicjacji b.e.}} = f(W)$	R^2
Nomex® 910	Orlen Trafo eN	$-30,49 \cdot \ln(W) + 165,46$	0,9811
Nomex® 910	Midel 7131	$-30,98 \cdot \ln(W) + 171,14$	0,9888
Nomex® 926	Orlen Trafo eN	$-30,42 \cdot \ln(W) + 160,00$	0,9873
Nomex® 926	Midel 7131	$-32,01 \cdot \ln(W) + 164,56$	0,9851

W tabelicy 3 zestawiono zalecenia normy [6]. Na szaro zaznaczono w niej układy izolacyjne, których temperatura pracy może okazać się wyższa od temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w materiałach Nomex® 910 i Nomex® 926. Do porównania wybrano wyniki pomiarów temperatury inicjacji b.e. w próbkach o typowym zawilgoceniu spotykanym w praktyce eksploatacyjnej (około 2%). Dla materiału Nomex® 910 było to 2,04%, a dla Nomex® 926 1,66%. Jak wynika z tablicy, dopuszczalna, z punktu widzenia inicjacji b.e., temperatura gorącego punktu (Hot-Spot) nie będzie przekroczona tylko w przypadku układu półhybrydowego przy normalnym obciążeniu. Wynika z tego, że nieprzekraczanie przez wysokotemperaturowy układ izolacyjny temperatury pracy dopuszczanej przez normę [6] może nie uchronić go przed wystąpieniem zjawiska bąbelkowania.

Tab.3. Zestawienie wybranych wartości temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania oraz dopuszczalnej temperatury pracy wysokotemperaturowych układów izolacyjnych

Parametr	Rodzaj układu izolacyjnego			
	Pół-hybrydowy	Mieszany hybrydowy	Pełny hybrydowy	Wysokotemperaturowy
A	140	150	165	190
B	150	160	175	200
C	170	180	195	220
D	148,5			
E	145,5			

- A - Dopuszczalna temperatura gorącego punktu (Hot-Spot) przy normalnym obciążeniu [°C]
- B - Dopuszczalna temperatura gorącego punktu przy długotrwałym awaryjnym przeciążeniu [°C]
- C - Dopuszczalna temperatura gorącego punktu przy krótkotrwałym awaryjnym przeciążeniu [°C]
- D - Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania materiału Nomex® 910 zawilgoconego do wartości 2,04% [°C]
- E - Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania materiału Nomex® 926 zawilgoconego do wartości 1,66% [°C]

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można wyciągnąć wniosek, że w układach izolacyjnych wysokotemperaturowych eksploatowanych zgodnie z normą [6] może wystąpić zjawisko bąbelkowania. Wynika to z faktu, że dopuszczalna w normie temperatura pracy materiałów wysokotemperaturowych nie uwzględnia ryzyka wystąpienia w nich zjawiska bąbelkowania. Wyniki badań pokazały, że temperatura inicjacji zjawiska w obu badanych materiałach aramidowych (Nomex® 910 oraz Nomex® 926) jest niższa niż dopuszczana przez normę temperatura ich pracy.

Należy jednak zwrócić uwagę na to, że degradacja termiczna materiałów aramidowych, w odróżnieniu od celulozy, nie powoduje powstawania wody. Stąd układy izolacyjne składające się tylko z materiałów aramidowych są mniej narażone na niekorzystne skutki wystąpienia zjawiska bąbelkowania niż, znacznie częściej spotykane, układy hybrydowe.

Autorzy: dr inż. Kamil Lewandowski, *Power Engineering Transformatory*, ul. Gdyńska 83, 62-004 Czerwonak, E-mail: k.lewandowski@petransformatory.pl; dr hab. inż. Hubert Morańda, *prof. uczelni, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki*, ul. Piotrowo 3A, 61-138 Poznań, E-mail: hubert.moranda@put.poznan.pl

LITERATURA

- [1] Yu S., 1. Zhao D., Chen W., Hou H., Oil-immersed power transformer internal fault diagnosis research based on probabilistic neural network, *The 2nd International Workshop on Wireless Technology Innovations in Smart Grid*, *Procedia Computer Science*, 83 (2016), 1327-1331
- [2] Sikorski, W.; Walczak, K.; Przybyłek, P. Moisture Migration in an Oil-Paper Insulation System in Relation to Online Partial Discharge Monitoring of Power Transformers. *Energies* 2016, 9, 1082.
- [3] Feng, J.; Wang, W.; Ma, X.; Wang, N.; Ma, H.; Wei, J. Insulation Breakdown Failure Analysis of a 500kV Power Transformer in Lightning Impulse Test. *IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2021.
- [4] Przybyłek P., A comparison of bubble evolution temperature in aramid and cellulose paper, *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics ICSD*, Italy, 30 June 2013-04 July 2013, 983-986.
- [5] Przybyłek, P. A comparison of bubble evolution temperature in aramid and cellulose paper. *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics*, Bologna, Italy, June 30-July 4, 2013.
- [6] IEC 60076-14 Power transformers – Part 14: Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials, 09.2013.
- [7] Lewandowski K., Zjawisko bąbelkowania w nowoczesnych układach izolacyjnych transformatorów energetycznych, *rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań*, 2023.
- [8] Lewandowski K., Morańda H., Zjawisko bąbelkowania w izolacji stałej transformatorów wykonanej na bazie celulozy oraz aramidu (Nomex® 926) zanurzonej w oleju mineralnym i estrze syntetycznym Midel 7131, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 98 Nr 10/2022.
- [9] Przybyłek P., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Zjawisko „bubble effect” w izolacji papierowo-olejowej o różnym stopniu zawilgocenia i zesterzenia, *PAK*, vol. 55, nr 1, 2009, str. 44-46.
- [10] Perkasa C.Y., Lelekakis N., Czaszejko T., Wijaya J., Martin D., A comparison of the Formation of Bubbles and Water Droplets in Vegetable and Mineral Oil Impregnated Transformer Paper, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 21, no. 5, October 2014.
- [11] Qin C., He Y., Shi B., Zhao T., Lv F., Cheng X., Experimental Study on Breakdown Characteristics of Transformer Oil Influenced by Bubbles, *Energies*, 11, 3, 634, 2018, 1-11
- [12] Marek R.P., Calil W., Galhardo L., Souza A., Practical verification of a high temperature insulation system for power transformers, substations and materials, *Brazylia* 2018.
- [13] IEEE Guide for the Application of High-Temperature Insulation Materials in Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers, *IEEE Std 1276TM*, 2020.
- [14] DuPont Nomex® 926 Technical Data Sheet, 04.2016.
- [15] DuPont Nomex® 910 Technical Data Sheet, 01.2017.
- [16] https://www.orlenoil.pl/PL/NaszaOferta/Produkty/Strony/produkt.aspx?produkt=ORLEN_OIL_TRAFO_EN, dostęp: 06.2024
- [17] Lalik M., Maleska M., Zdanowski M., Badania podstawowych właściwości fizycznych i elektrycznych estru Midel 7131®, *Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, No 94, 2018.
- [18] Różga P., Wytrzymałość elektryczna transformatorowych płynów izolacyjnych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R 90 Nr 1/2014.