

# Zjawisko bąbelkowania w izolacji stałej transformatorów wykonanej na bazie celulozy oraz aramidu (Nomex<sup>®</sup> 926) zanurzonej w oleju mineralnym i estrze syntetycznym Midel 7131

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono porównanie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w układach izolacyjnych transformatorów energetycznych opartych na celulozie oraz aramidzie. Do badań wykorzystano papier celulozowy typu Kraft oraz wysokotemperaturowy materiał izolacyjny Nomex<sup>®</sup> 926. Próbki zanurzone były w oleju mineralnym oraz estrze syntetycznym Midel 7131. Wyniki badań wskazują na to, że temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w układach izolacyjnych typu izolacja stała-ciecz izolacyjna w istotny sposób zależy od polarności komponentów tworzących dany układ izolacyjny.

**Abstract.** The article presents a comparison of the bubble phenomenon initiation temperature in the insulation systems of power transformers based on cellulose and aramid. Kraft cellulose paper and high-temperature insulation material Nomex<sup>®</sup> 926 were used for the tests. The samples were immersed in mineral oil and synthetic ester Midel 7131. The test results indicate that the temperature of bubble initiation in insulation systems consisting of solid insulation-insulating liquid significantly depends on the polarity of the insulation system components. (**Bubble effect phenomenon in transformer solid insulation based on cellulose and aramid (Nomex<sup>®</sup> 926) in the mineral oil and synthetic ester Midel 7131**).

**Słowa kluczowe:** zjawisko bąbelkowania, Nomex<sup>®</sup> 926, ester syntetyczny Midel 7131, izolacja transformatorów energetycznych.  
**Keywords:** bubble effect, Nomex<sup>®</sup> 926, synthetic ester Midel 7131, power transformers insulation.

## Wstęp

Transformatory energetyczne zaliczają się do kluczowych elementów systemu elektroenergetycznego. Ze względu na fakt, że awarie transformatorów są niezwykle kosztowne i powodują przerwy w dostawie energii elektrycznej, zrozumienie zjawisk mogących doprowadzić do ich uszkodzenia oraz prawidłowa diagnostyka prewencyjna są niezwykle ważne [1].

Jedną z częstych przyczyn awarii transformatorów jest zbyt duże zawilgocenie układu izolacyjnego uzwojeń. Woda ma negatywny wpływ na parametry elektroizolacyjne układu celulozowo-olejowego, a ponadto jest katalizatorem procesów starzeniowych izolacji, co znacząco skraca czas życia transformatora. W skrajnym przypadku, po przekroczeniu krytycznej temperatury, można spodziewać się gwałtownego uwolnienia pary wodnej z izolacji transformatora (zjawisko bąbelkowania, ang. *bubble effect*) i, w konsekwencji, do jego awarii.

W artykule dokonano analizy temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w układach składających się z różnych materiałów stałych (papier celulozowy oraz aramidowy) zanurzonych w różnych cieczach elektroizolacyjnych (olej mineralny oraz ester syntetyczny).

Aktualnie dostępna literatura przedstawia zjawisko bubble effect zachodzące w materiałach celulozowych oraz aramidowych [2, 3, 4, 5], jednak brak jest wzmianek o badaniach tego zjawiska w materiale Nomex<sup>®</sup> 926.

Sformułowano tezę mówiącą, że: *Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w złożonych układach izolacyjnych zależy w istotny sposób od polarności komponentów tworzących układ izolacyjny; przyjmuje się, że prostą miarą polarności materiału jest przenikalność elektryczna.*

## Porównanie właściwości oleju mineralnego i estru syntetycznego

Olej mineralny to ciecz elektroizolacyjna produkowana na bazie ropy naftowej, zbudowana z węglowodorów o strukturze parafinowej, naftenowej i aromatycznej. Olej ten jest używany jako izolacja ciekła transformatorów energetycznych niemal od samego początku elektroenergetyki i nadal jest najpopularniejszym medium ciekłym stosowanym w transformatorach.

Olej mineralny jest szczególnie chętnie stosowany ze względu na jego dobre właściwości chłodzące oraz elektroizolacyjne. Parametry, które muszą spełniać świeże oleje mineralne, określono w europejskiej normie [6].

W ostatnim czasie na świecie można zaobserwować rosnące zainteresowanie alternatywnymi cieczami elektroizolacyjnymi [7, 8]. Szczególnym zainteresowaniem cieszą się estry naturalne i syntetyczne, np. Midel 7131. Wynika to, przede wszystkim, z faktu, że ciecze te są biodegradowalne, co świetnie wpisuje się we współczesne tendencje związane z ochroną środowiska. Ponadto, charakteryzują się one większym bezpieczeństwem pożarowym, przez co mogą być skutecznie stosowane w miejscach szczególnie narażonych na pożary. Inną, nie zawsze wspomnianą, zaletą estrów jest ich bardzo wysoka chłonność wody (ok. 30-50 krotnie większa w porównaniu do oleju mineralnego), co skutkuje łatwiejszym osuszaniem izolacji stałej transformatora, dzięki czemu przedłuża się jej żywotność [9, 10].

W tabeli 1 przedstawiono porównanie podstawowych właściwości oleju mineralnego Nytro Taurus i estru syntetycznego Midel 7131.

Tabela 1. Porównanie podstawowych parametrów oleju mineralnego Nytro Taurus oraz estru syntetycznego Midel 7131 [11, 12]

Parametr	Jednostka	Midel 7131	Nytro Taurus
Gęstość w 20 °C	kg/m <sup>3</sup>	970	872
Lepkość kinematyczna w 40 °C	m <sup>2</sup> /s	29,5·10 <sup>-6</sup>	9,6·10 <sup>-6</sup>
Temperatura płynięcia	°C	-60	-48
Temperatura zapłonu par	°C	260	150
Biodegradowalność	%	89	10
Napięcie przebicia	kV	>75	>70
Współczynnik stratności dielektrycznej w 90 °C	-	<0,008	<0,001

Podstawową przewagą oleju mineralnego nad MIDEL7131, poza znacznie niższą ceną, jest jego mniejsza lepkość (co ułatwia chłodzenie uzwojeń i rdzenia transformatora) oraz wieloletnie doświadczenie eksploatacyjne. Z kolei Midel 7131 charakteryzuje się wysoką biodegradowalnością, na poziomie 89% oraz wysoką temperaturą zapłonu par – 260 °C (w stosunku do 150 °C dla oleju mineralnego).

### Materiały izolacyjne na bazie aramidu

Izolacja stała transformatorów ma za zadanie wytrzymać naprężenia elektryczne, mechaniczne i termiczne, na które jest on nieustannie narażony w trakcie eksploatacji. Izolacja na bazie aramidu zbudowana jest z materiałów, które charakteryzują się zwiększoną (w stosunku do celulozy) wytrzymałością termiczną, przez co zyskały miano izolacji wysokotemperaturowej.

Stosowanie izolacji wysokotemperaturowej w transformatorach niesie za sobą szereg zalet [13]:

- wydłuża czas życia układu izolacyjnego,
- umożliwia większe krótkotrwałe przeciążenia termiczne bez ryzyka uszkodzenia materiału izolacyjnego,
- zastosowanie tej izolacji w najgorętszych punktach transformatora (ang. *hot-spot*) pozwala zoptymalizować jego konstrukcję.

Największą wadą wysokotemperaturowych materiałów izolacyjnych jest ich cena. Szacuje się, że zastosowanie w transformatorze izolacji wysokotemperaturowej, opartej o materiały bazujące na aramidzie, i napełnienie go estrem może zwiększyć koszt produkcji tego transformatora o ok. 30% [14].

Spośród dostępnych na rynku wysokotemperaturowych materiałów izolacyjnych szczególnym zainteresowaniem cieszą się materiały produkowane przez firmę DuPont, spośród których można wyróżnić Nomex<sup>®</sup> 926. Materiał ten składa się w całości z włókien aramidowych. Można go zakupić tylko w postaci rolki papieru o grubości 0,05 mm.

W tabeli 2 przedstawiono wartości typowych parametrów materiału Nomex<sup>®</sup> 926.

Tabela 2. Podstawowe parametry Nomex<sup>®</sup> 926 [15]

Parametr	Jednostka	Wartość
Grubość (typowa)	mm	0,057
Masa jednostkowa	g/m <sup>2</sup>	40
Gęstość	g/cm <sup>3</sup>	0,71
Współczynnik stratności dielektrycznej dla 60 Hz w oleju mineralnym w temperaturze 23 °C	[-]	0,008
Przenikalność elektryczna dla 60 Hz w oleju mineralnym w temperaturze 23 °C	[-]	2,94
Napięcie przebicia w oleju mineralnym (1 warstwa)	kV/mm	66

### Przenikalność elektryczna cieczy i materiałów izolacyjnych

Przenikalność elektryczna materiałów ma kluczowe znaczenie w aspekcie zjawiska adsorpcji i desorpcji wody. Aramid najczęściej charakteryzuje się mniejszą przenikalnością elektryczną niż materiały na bazie celulozy, co sprzyja polepszeniu rozkładu pola elektrycznego w układzie z olejem mineralnym. Należy jednak pamiętać, że wypadkowa wartość przenikalności elektrycznej w przypadku układu izolacja stała-ciecz izolacyjna będzie zależna od przenikalności obu składników.

Materiały o mniejszej przenikalności elektrycznej wchłaniają w tych samych warunkach mniej wody niż materiały o większej przenikalności [16].

W tabelach 3 oraz 4 przedstawiono typowe wartości przenikalności elektrycznej cieczy oraz materiałów izolacyjnych stosowanych w transformatorach. Jak widać, ester syntetyczny i naturalny charakteryzują się wyższą wartością przenikalności elektrycznej niż olej mineralny czy silikonowy, co ma kluczowe znaczenie w zjawiskach adsorpcji i desorpcji wody.

Tabela 3. Typowe wartości przenikalności elektrycznej cieczy elektroizolacyjnych [8]

Ciecz izolacyjna	Względna przenikalność elektryczna w 25 °C $\epsilon_r$ [-]
Olej mineralny	2,2
Ester naturalny	3,2
Ester syntetyczny	3,2
Olej silikonowy	2,1

Tabela 4. Typowe wartości przenikalności elektrycznej materiałów izolacyjnych stałych [8]

Materiał izolacyjny	Względna przenikalność elektryczna w 25 °C $\epsilon_r$ [-]
Celuloza	2,9 – 4,6
Aramid	1,6 – 3,5

### Zjawisko bąbelkowania

Zjawisko bąbelkowania należy rozumieć jako gwałtowne uwalnianie pary wodnej z zawilgoconej izolacji stałej transformatora pod wpływem oddziaływania wysokiej temperatury [2]. Zjawisko to jest niezwykle niebezpieczne, gdyż może doprowadzić do wzrostu ciśnienia w kadzi transformatora [3], a w konsekwencji do jego rozszczelnienia i pożaru.

Bubble effect powoduje również pogorszenie parametrów elektroizolacyjnych tej części układu izolacyjnego, w którym się pojawił. Wartość napięcia przebicia układu izolacyjnego po pojawieniu się zjawiska bąbelkowania może zmaleć nawet o 60% [4], co również może doprowadzić do poważnej awarii transformatora.

Zjawisko bąbelkowania powstaje, gdy temperatura materiału izolacyjnego przekroczy wartość, którą nazywa się temperaturą inicjacji zjawiska bąbelkowania. Wysokość tej temperatury maleje wraz z:

- wzrostem zawilgoconia materiału izolacyjnego,
- spadkiem stopnia polimeryzacji celulozy,
- wzrostem zawartości gazów rozpuszczonych w oleju.

Największy wpływ na wysokość temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania ma zawilgoconie izolacji stałej, dlatego niezwykle istotna jest kontrola stopnia zawilgoconia tej izolacji w trakcie eksploatacji transformatorów. Temperatura ta może się znacząco zmieniać w zależności od zawilgoconia izolacji. Z badań prezentowanych w [3] wynika, że dla układu izolacyjnego celuloza-olej mineralny, wzrost zawilgoconia celulozy z 1% do 5% powoduje bardzo duży spadek temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania (z 180 °C do 100 °C).

Wzrost temperatury izolacji transformatora do wartości, przy której rozpocznie się bąbelkowanie, może być spowodowane szeregiem czynników, w tym: jego krótkotrwałym lub długotrwałym przeciążeniem, awarią układu chłodzenia czy częściowym zablokowaniem kanału olejowego chłodzącego uzwojenia. Ostatnia z wymienionych przyczyn jest szczególnie niebezpieczna, gdyż jej wykrycie bez zainstalowania w transformatorze światłowodowego systemu pomiaru temperatury uzwojeń jest praktycznie niemożliwe.

### Badania i ich wyniki

Głównym celem badań było porównanie temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w czterech układach

izolacyjnych stosowanych w transformatorach energetycznych:

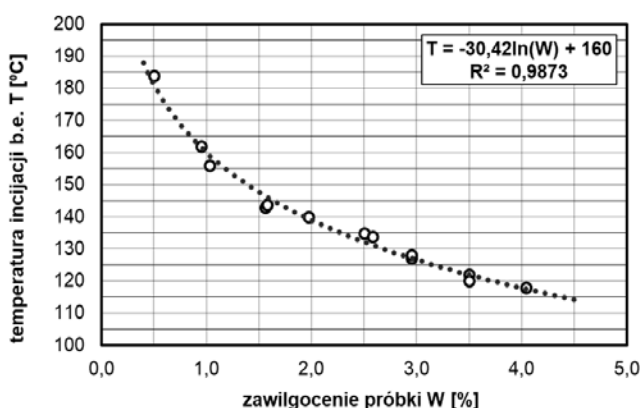
- papier celulozowy-olej mineralny,
- papier celulozowy-ester syntetyczny,
- papier aramidowy-olej mineralny,
- papier aramidowy-ester syntetyczny.

W badaniach wykorzystano transformatorowy olej mineralny Orlen Trafo EN oraz ester syntetyczny Midel 7131, a także papier aramidowy Nomex<sup>®</sup> 926 oraz papier celulozowy Kraft. Wszystkie wymienione materiały były niestarzone. Oba materiały stałe różnią się przenikalnością elektryczną oraz higroskopijnością.

Materiały izolacyjne przygotowywano do badań przez poddawanie ich procesowi suszenia próżniowego (8 h, 105 °C,  $4 \cdot 10^{-1}$  mbar), a następnie kondycjonowano w komorze klimatycznej Binder MKF240 E3, nastawianej na określone parametry wilgotności i temperatury powietrza, aż do osiągnięciażądanego zawilgocenia próbek. Podczas kondycjonowania zawartość wody w próbkach kontrolowano metodą wagową lub metodą miareczkowania Karla-Fischera. Próbki o bardzo małej wartości zawilgocenia preparowano poprzez stopniowe zawilgacanie wysuszonej próbki w powietrzu z jednoczesną ciągłą kontrolą masy próbki.

Przygotowane do badań próbki celulozowe charakteryzowały się zawilgoceniem w zakresie od 0,65% do 6,17%.

Na rysunku 1 przedstawiono przykładowy wynik pomiarów temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w zależności od zawilgocenia próbek. W dalszej części artykułu autorzy już zrezygnowali z zaznaczania na wykresach punktów pomiarowych ze względu na ich czytelność.



Rys.1. Wyniki pomiarów temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania dla materiału Nomex<sup>®</sup> 926 zanurzonego w oleju mineralnym

Materiał na bazie aramidu kondycjonowany w tych samych warunkach klimatycznych (temperatura i wilgotność powietrza) co celuloza zawilgaca się w mniejszym stopniu, ze względu na jego mniejszą zdolność do chłonięcia wody, co można wiązać z jego mniejszą polarnością.

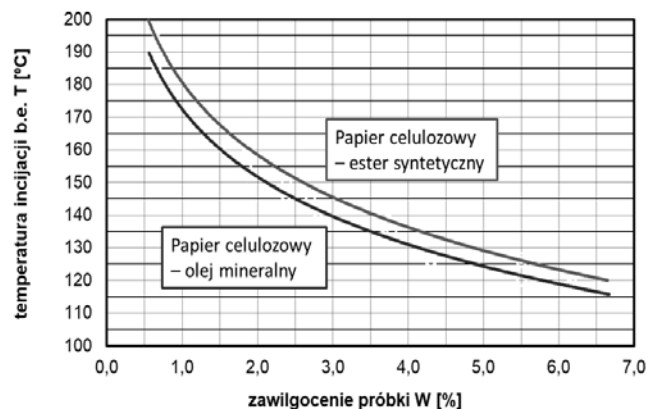
Badane materiały zostały przygotowane w taki sposób, aby ich objętość była taka sama. W tym celu każdą próbkę materiału docinano do szerokości 10 cm, a jej długość dobierano w taki sposób, aby skompensować różnicę w grubości poszczególnych materiałów (grubość celulozy – 0,055 mm, aramidu – 0,050 mm). Następnie każda próbka została nawinięta na aluminiowy patron w kształcie walca o długości 120 mm i średnicy 16 mm, który został założony na grzałkę i zanurzony w badanej cieczy elektroizolacyjnej (rys. 2). Temperatura patronu była mierzona w specjalnie wykonanym w tym celu otworze. W trakcie badań

podnoszono powoli temperaturę izolacji stałej, na początku z prędkością ok. 1°C/s, a w pobliżu spodziewanej temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania z prędkością ok. 0,1°C/s.

Na rysunkach 3 i 4 pokazano wyniki pomiarów temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w dwóch badanych cieczach izolacyjnych (olej mineralny i ester syntetyczny) dla obu badanych materiałów izolacyjnych stałych: celulozy oraz Nomex<sup>®</sup> 926.



Rys.2. Fotografia próbki zanurzonej w cieczy w naczyniu badawczym w trakcie trwania zjawiska bąbelkowania

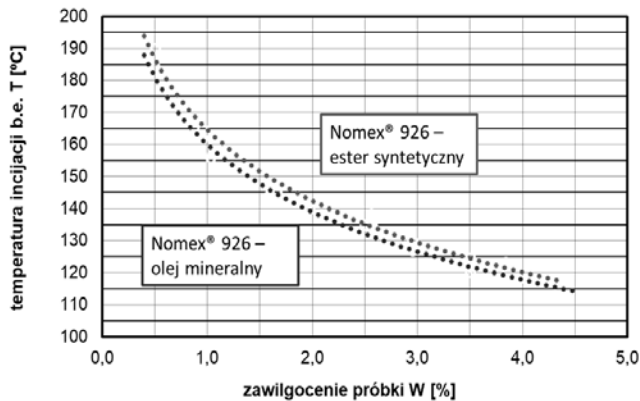


Rys.3. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania dla papieru celulozowego zanurzonego w dwóch cieczach izolacyjnych: oleju mineralnym oraz estrze syntetycznym

Z badań wynika, że temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania izolacji stałej jest wyższa w estrze syntetycznym niż w oleju mineralnym – niezależnie od materiału, z którego została wykonana ta izolacja. Można to powiązać z faktem, że wartość przenikalności elektrycznej estru syntetycznego jest ok. 1,5 razy większa niż oleju mineralnego.

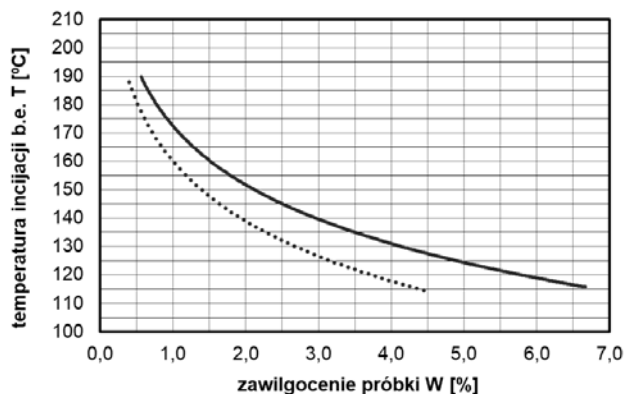
Szczególną cechą MIDEL 7131, również mogącą mieć wpływ na podniesienie wartości temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania w stosunku do oleju mineralnego, jest jego wysoka chłonność wody. Z tego powodu zjawisko

bąbelkowania rozpoczyna się w nieco wyższej temperaturze niż ma to miejsce w przypadku oleju mineralnego. Tłumaczyć to można w ten sposób, że uwalniana z izolacji stała para wodna jest początkowo wchłaniana przez ester. Można więc postawić tezę, że stosowanie alternatywnych, biodegradowalnych cieczy izolacyjnych, jakimi są estry syntetyczne, nieco zmniejsza ryzyko wystąpienia zjawiska bąbelkowania w izolacji transformatora.



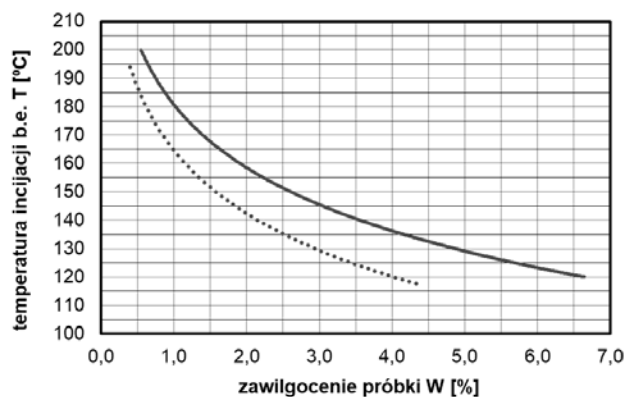
Rys.4. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania dla materiału Nomex® 926 zanurzonego w dwóch cieczach izolacyjnych: oleju mineralnym oraz estrze syntetycznym

W celu porównania zbadanych materiałów izolacyjnych na rysunkach 5 i 6 zestawiono wyniki badań dla obu materiałów zanurzonych w jednej cieczy.



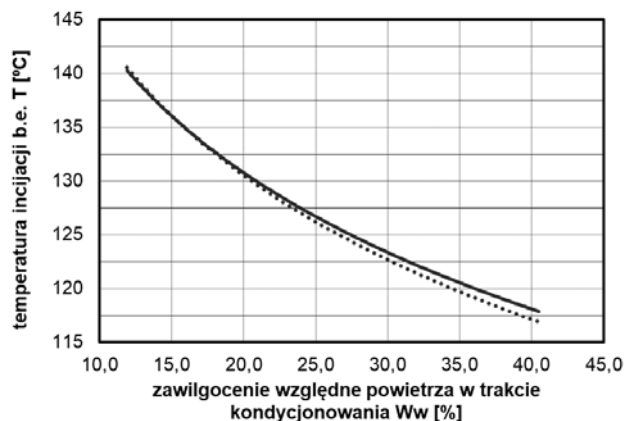
Rys.5. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania dla papieru celulozowego (linia ciągła) oraz materiału Nomex® 926 (linia kropkowana) zanurzonych w oleju mineralnym

Papier aramidowy Nomex® 926 o tym samym zawilgoceniu co papier celulozowy charakteryzuje się niższą temperaturą inicjacji zjawiska bąbelkowania. Przykładowo, dla typowego zawilgocenia papieru celulozowego spotykanego w transformatorach energetycznych, równego 2,5%, temperatura inicjacji bubble effect w papierze celulozowym zanurzonego w oleju mineralnym jest o ok. 13 °C wyższa niż w papierze aramidowym (dla tego samego zawilgocenia względnego). W estrze syntetycznym różnica ta jest jeszcze większa, bo sięga ok. 16 °C. Wyniki badań wykazały, że papier aramidowy, który odznacza się niższą wartością przenikalności elektrycznej niż papier celulozowy, charakteryzuje się niższą temperaturą inicjacji zjawiska bąbelkowania.



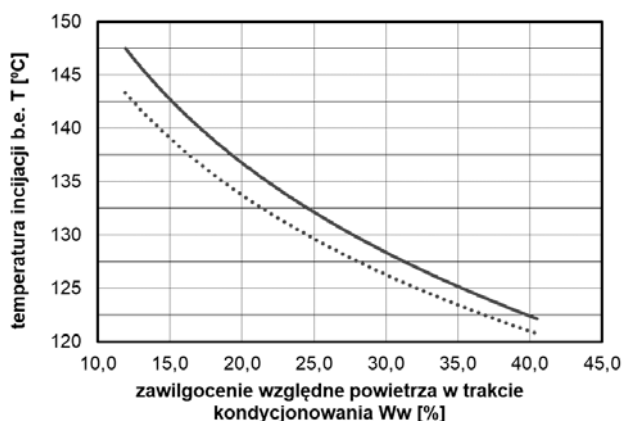
Rys.6. Wyniki pomiarów temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania dla papieru celulozowego (linia ciągła) oraz materiału Nomex® 926 (linia kropkowana) zanurzonych w estrze syntetycznym

W rzeczywistym warunkach panujących w eksploatowanym transformatorze porównywanie obu materiałów stałych o takim samym zawilgoceniu nie jest jednak poprawne, ponieważ w tej sytuacji papier aramidowy będzie zawilgocony w mniejszym stopniu niż papier celulozowy. Z tego powodu dalej (na rysunkach 7 i 8) zestawiono również wartości temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania odnoszące się do zawilgocenia względnego powietrza w czasie kondycjonowania próbek przed pomiarami. Odpowiada to sytuacji, gdy papier celulozowy i aramidowy znajdują się w tym samym transformatorze i są zanurzone w tej samej cieczy izolacyjnej. Przedstawione wykresy dotyczą tylko tej części próbek, które były kondycjonowane w temperaturze 40 °C.



Rys.7. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania dla papieru celulozowego (linia ciągła) oraz materiału aramidowego Nomex® 926 (linia kropkowana) zanurzonych w oleju mineralnym w zależności od wartości zawilgocenia względnego powietrza podczas kondycjonowania próbek (temperatura kondycjonowania 40 °C)

Oba materiały badane w oleju mineralnym charakteryzują się zbliżoną wartością temperatury inicjacji bubble effect (rys. 7). W przypadku zastosowania estru syntetycznego różnica pomiędzy papierem celulozowym a aramidowym wskazuje na, nieco zaskakująco, lepsze właściwości celulozy, gdyż charakteryzuje się ona wyższą temperaturą inicjacji zjawiska bąbelkowania (rys. 8). Zdaniem autorów, może to być spowodowane szybszym tempem rozpuszczania w estrze wody z celulozy niż z materiału aramidowego, jednak wymaga to jeszcze dalszych badań.



Rys.8. Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania dla papieru celulozowego (linia ciągła) oraz materiału aramidowego Nomex® 926 (linia kropkowana) zanurzonych w estrze syntetycznym w zależności od wartości zawilgocenia względnego powietrza podczas kondycjonowania próbek (temperatura kondycjonowania 40 °C)

### Podsumowanie

Bubble effect jest niezwykle groźnym zjawiskiem, mogącym skutkować pogorszeniem parametrów elektroizolacyjnych, a w konsekwencji wystąpieniem przebiccia układu izolacyjnego uzwojeń transformatora.

Autorzy przeprowadzili szereg badań z użyciem papieru celulozowego Kraft oraz papieru aramidowego Nomex® 926. Próbki każdorazowo były kondycjonowane, aż do osiągnięcia żądanego stopnia zawilgocenia, a następnie zanurzane w cieczy izolacyjnej. Temperatura badanego materiału była stopniowo podnoszona od pokojowej do momentu pojawienia się zjawiska bąbelkowania.

Stosowanie alternatywnych cieczy elektroizolacyjnych, w postaci estrów syntetycznych, obniża ryzyko awarii transformatora wskutek wystąpienia zjawiska bąbelkowania, poprzez zwiększenie temperatury inicjacji tego zjawiska. W przeprowadzonych badaniach temperatura ta była wyższa dla estru syntetycznego niż dla oleju mineralnego dla obu badanych materiałów stałych.

Temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania jest niższa dla materiałów aramidowych niż dla materiałów celulozowych tak samo zawilgoconych.

Temperatura inicjacji zjawiska bubble effect zależy w istotny sposób od polarności komponentów tworzących dany układ izolacyjny. Układ izolacyjny papier celulozowy-ester syntetyczny, który charakteryzuje się najwyższymi wartościami przenikalności elektrycznej obu składników, charakteryzują się również najwyższą temperaturą inicjacji zjawiska bąbelkowania.

Oba badane materiały stałe, papier celulozowy Kraft oraz materiał na bazie aramidu Nomex® 926, w przypadku, gdy kondycjonowane były w tych samych warunkach, a następnie zanurzone w oleju mineralnym, charakteryzują się zbliżoną wartością temperatury inicjacji zjawiska bąbelkowania. Jest to spowodowane tym, że Nomex® 926 zawilgaczany w tych samych warunkach klimatycznych co celuloza chłonie od niej mniej wody, co niweluje wpływ polarności tego materiału na temperaturę inicjacji zjawiska.

W przypadku kondycjonowania obu materiałów stałych w tym samych warunkach i po zanurzeniu ich w estrze syntetycznym stwierdzono wyższą temperaturę inicjacji zjawiska bąbelkowania w przypadku papieru celulozowego. Wyjaśnienie tego zachowania wymaga dalszych badań.

Przedstawione w pracy wyniki badań wykazały, że temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania w zależności od materiału izolacji stałej i rodzaju cieczy elektroizolacyjnej

mieści się w zakresie temperatury od ok. 120 °C do 200 °C. Jest to temperatura możliwa do osiągnięcia przez izolację transformatora w trakcie jego eksploatacji.

Ponieważ temperatura inicjacji zjawiska bąbelkowania znacząco spada wraz ze spadkiem zawilgocenia izolacji stałej, niezwykle istotna jest okresowa kontrola jej zawilgocenia oraz kontrola temperatury pracy transformatora.

**Autorzy:** mgr inż. Kamil Lewandowski, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 5, 61-138 Poznań, E-mail: [kamil.wo.lewandowski@doctorate.put.poznan.pl](mailto:kamil.wo.lewandowski@doctorate.put.poznan.pl), Power Engineering Transformatory ul. Gdyńska 83, 62-004 Czerwonak, E-mail: [k.lewandowski@petransformatory.pl](mailto:k.lewandowski@petransformatory.pl); dr hab. inż. Hubert Morańda, prof. uczelni, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 5, 61-138 Poznań, E-mail: [hubert.moranda@put.poznan.pl](mailto:hubert.moranda@put.poznan.pl)

### LITERATURA

- [1] Yu S., Zhao D., Chen W., Hou H., Oil-immersed power transformer internal fault diagnosis research based on probabilistic neural network, *The 2<sup>nd</sup> International Workshop on Wireless Technology Innovations in Smart Grid, Procedia Computer Science*, 83 (2016), 1327-1331
- [2] Przybytek 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
- [3] Przybytek 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, 44-46
- [4] 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
- [5] Tyuftyaev A.S., Gadzhiev M. Kh., Sargsyan M. A., Akimov P.L., Demirov N.A., The effect of gas bubbles on electrical breakdown in transformer oil, *Journal of Physics: Conference Series* 774, 2016, 1-6
- [6] IEC 60296 Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear, 2012
- [7] CIGRE Brochure 436, Experiences in service with new insulating liquids, 2010
- [8] IEEE Guide for the Application of High-Temperature Insulation Materials in Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers, *IEEE Std. 1276*, 2020
- [9] Przybytek P., Water saturation limit of insulating liquids and hygroscopicity of cellulose in aspect of moisture determination in oil-paper insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23 (2016), n. 3, 1886-1893
- [10] Przybytek P., Morańda H., Mościcka-Grzesiak H., Kownacki I., Zawisz R., Suszenie izolacji transformatorów rozdzielczych z wykorzystaniem medium ciekłego, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 94, NR 10/2018, 18-21
- [11] Lalik M., Maleska M., Zdanowski M., Badania podstawowych właściwości fizycznych i elektrycznych estru Midel 7131<sup>®</sup>, *Poznań University of Technology Academic Journals, Electrical Engineering*, No. 94, 2018, 331-342
- [12] Różga P., Wytrzymałość elektryczna transformatorowych płynów izolacyjnych na bazie estrów syntetycznych i naturalnych, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 90, Nr 1/2014, 245-247
- [13] Marek R. P., Calil W., Galhardo L., Souza A., Practical verification of a high temperature insulation system for power transformers, substations and materials, proceedings of the IX WORKSPOT – International Workshop on Power Transformers, Equipment, Substations and Materials, Brasil, 25-28 November 2018
- [14] Kaźmierski M., Olech W., Diagnostyka techniczna i monitoring transformatorów, ENERGOPOMIAR - ELEKTRYKA Sp. z o.o. Gliwice, 2013
- [15] DuPont™ Nomex® 926 Technical Data Sheet, 04.2016
- [16] Arai E., Arai T., Mechatronics for Safety, Security and Dependability in a New Era, chapter 16, September 7, 2006