

Badanie temperatury zapłonu cieczy elektroizolacyjnych narażonych na oddziaływanie wyładowań niezupełnych

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ gazów palnych, generowanych w cieczach elektroizolacyjnych na skutek wyładowań niezupełnych, na temperaturę zapłonu par tych cieczy. Analizowano trzy najczęściej stosowane obecnie cieczki izolacyjne: olej mineralny oraz estry naturalny i syntetyczny. Zbadano wpływ zawilgocenia cieczy na intensywność generacji gazów palnych w badanych cieczkach.

Abstract. The article presents the influence of combustible gases, generated in the insulating liquids due to partial discharges, on flash point of liquids. Three most currently used insulating liquids such as mineral oil, synthetic ester and natural ester were analyzed. The impact of moisture content in liquids on the intensity of generation of combustible gases in the test liquids was investigated. (Investigation of the flash point of the insulating liquids exposed to partial discharges).

Słowa kluczowe: temperatura zapłonu, cieczki elektroizolacyjne, wyładowania niezupełne, analiza gazów rozpuszczonych.

Keywords: flash point, insulating liquids, partial discharges, dissolved gas analysis.

Wprowadzenie

Olej mineralny jest jedną z najczęściej stosowanych cieczy elektroizolacyjnych. Wykorzystuje się go w wielu urządzeniach elektroenergetycznych. Jednakże w ostatnich latach obserwuje się wzrost zainteresowania cieczkami alternatywnymi, do których zaliczamy estry syntetyczne oraz estry naturalne [1]. Ciecze te, w odniesieniu do oleju mineralnego, charakteryzują się szeregiem cech, które uznawane są za ich zalety. Do tych cech zaliczamy przede wszystkim walory ekologiczne (biodegradowalność, nietoksyczność) oraz bezpieczeństwo eksploatacji (wysoka temperatura zapłonu oraz palenia) [1, 2, 3].

Bezpieczeństwo pożarowe, wynikające bezpośrednio z eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, jest aktualnie jednym z istotniejszych problemów z jakimi borykają się ich producenci oraz użytkownicy. Dotyczy to przede wszystkim urządzeń wypełnionych cieczkami elektroizolacyjnymi, wykorzystywanych w obszarach zabudowanych oraz gęsto zaludnionych. Ponadto, firmy zajmujące się ubezpieczeniem majątku sieciowego, w tym urządzeń elektroenergetycznych, są coraz bardziej świadome ryzyka pożarowego związanego z zastosowaniem różnych rodzajów cieczy elektroizolacyjnych. W związku z tym wymagają od użytkowników urządzeń elektroenergetycznych określenia specyfiki pożarowej zastosowanych cieczy [1, 4].

Norma PN-EN 61100 wprowadziła klasyfikację cieczy elektroizolacyjnych w zależności od ich zachowania w warunkach pożaru. System klasyfikacji opisany w niniejszej normie oparty został na dwóch właściwościach cieczy: temperaturze palenia oraz dolnej wartości opałowej. Temperatura palenia oznacza względną wartość zapłonu cieczy. Kryterium określającym stopień zagrożenia pożarowego jest dolna wartość opałowa charakteryzująca energię cieplną wydzielaną przez ciecz elektroizolacyjną w trakcie jej palenia [5].

Inną istotną właściwością cieczy elektroizolacyjnych w zakresie bezpieczeństwa ich eksploatacji jest temperatura zapłonu. Właściwość ta określa minimalną temperaturę, w której ciecz generuje taką ilość gazów, przy której ulegają one zapaleniu się po zbliżeniu płomienia. Może być ona zatem stosowana do określenia łatwopalności substancji w trakcie ich transportu, składowania i eksploatacji [1, 6].

Aktualnie prowadzone są liczne badania dotyczące wyznaczenia typowych wartości stężeń gazów rozpuszczonych w estrach syntetycznych i naturalnych. Prace te mają na celu poprawę interpretacji wyników badań urządzeń wypełnionych tymi cieczkami [7, 8].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań temperatury zapłonu par cieczy elektroizolacyjnych charakteryzujących się różnym stopniem zawilgocenia, które zostały poddane narażeniu w postaci wyładowań niezupełnych.

Obiekt badań

Cieczkami, które wykorzystano w badaniach były: olej mineralny Nytro Draco produkowany przez firmę Nynas, ester syntetyczny MIDEL 7131 wytwarzany przez firmę M&I Materials oraz ester naturalny Envirotemp FR3 produkowany przez firmę Cargil. Do testów przygotowano próbki cieczy, które charakteryzowały się niskim (5%) oraz bardzo wysokim (80%) stopniem zawilgocenia względnego. Próbkę te poddano również narażeniu polegającemu na umieszczeniu ich w silnie niejednorodnym polu elektrycznym. Układ do narażania cieczy polem elektrycznym o wysokim natężeniu przedstawiony został w dalszej części artykułu.

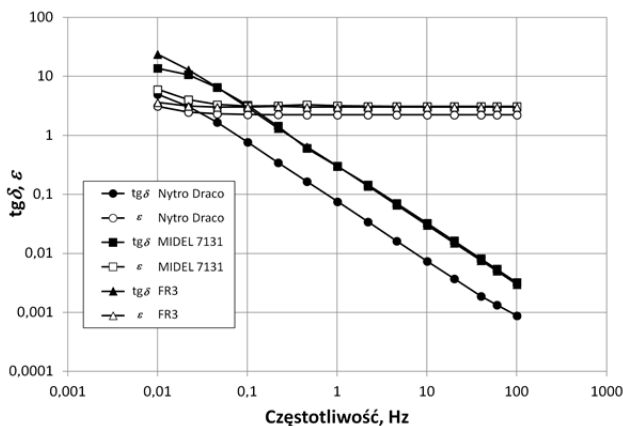
W tabeli 1 przedstawiono wartości temperatury zapłonu poszczególnych cieczy podawane przez literaturę i producenta. Analizując przedstawione w tabeli informacje można zauważyć, że estry naturalne, w odniesieniu do oleju mineralnego, charakteryzują się ponad dwukrotnie większą temperaturą zapłonu par. Z kolei temperatura zapłonu par estrów syntetycznych jest o ponad 100 °C większa od temperatury zapłonu par oleju mineralnego.

Tabela 1. Wartości temperatury zapłonu poszczególnych cieczy elektroizolacyjnych podawane przez literaturę i producenta [1, 9, 10, 11]

Rodzaj cieczy	Temperatura zapłonu, °C	
	Cigre Brochure 436	producent
Olej mineralny Nytro Draco	-	135 ¹⁾ /148
Ester syntetyczny MIDEL 7131	275	250 ¹⁾ /260
Ester naturalny FR3	330	310 – 320

¹⁾ wartość minimalna

Zakupione cieczki zostały dostarczone przez dystrybutorów w różnym stanie zawilgocenia. Ciecze można było zakwalifikować jako suche, jednak poddano je dodatkowej obróbce, tak aby uzyskały tę samą wartość zawilgocenia względnego, w wypadku opisywanym w eksperymencie zawilgocenie ustalono na 5% wilgotności względnej. Tak przygotowane cieczki poddano badaniom właściwości dielektrycznych. Wyznaczono zależności przenikalności elektrycznej względnej (ϵ_w) oraz tangensa kąta strat dielektrycznych ($\tan\delta$) od częstotliwości (rys. 1). Wartość skuteczna napięcia, przy którym dokonano pomiarów wynosiła 140 V, natomiast temperatura cieczy wynosiła 50 °C.



Rys. 1. Przenikalność elektryczna względna oraz tangens kąta strat dielektrycznych w zależności od częstotliwości dla świeżych cieczy o zawilgoceniu względnym 5%, temperatura 50 °C

Zgodnie z danymi fabrycznymi [9, 10, 11], w stanie suchym, olej mineralny charakteryzował się najniższymi stratami dielektrycznymi oraz najniższymi wartościami przenikalności elektrycznej. Ciecze estrowe charakteryzowały się zbliżonymi wartościami badanych wielkości.

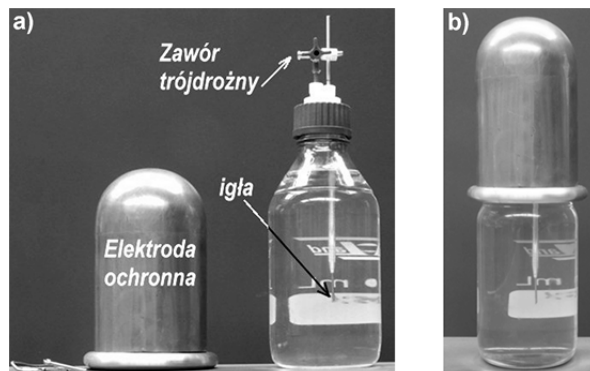
Układ do badania temperatury zapłonu

Do oznaczania temperatury zapłonu cieczy elektroizolacyjnych wykorzystano układ pomiarowy zbudowany w oparciu o normę PN-EN ISO 2719 [6]. Norma ta zakłada oznaczanie temperatury zapłonu cieczy przy wykorzystaniu metody zamkniętego tygła Pensky'ego-Martensa. Pomiar polega na umieszczeniu próbki badanej cieczy w tyglu i nagrzewaniu jej (ze stałym wzrostem temperatury) wraz z równoczesnym mieszaniem. Źródło zapłonu doprowadzane jest do tygla w regularnych odstępach temperatury przez otwór, przy jednoczesnym przerywaniu mieszania. Najniższa temperatura, przy której nastąpi zapłon par badanej cieczy, jest traktowana jako temperatura zapłonu przy danym ciśnieniu atmosferycznym.

Układ do narażania cieczy polem elektrycznym o wysokim natężeniu

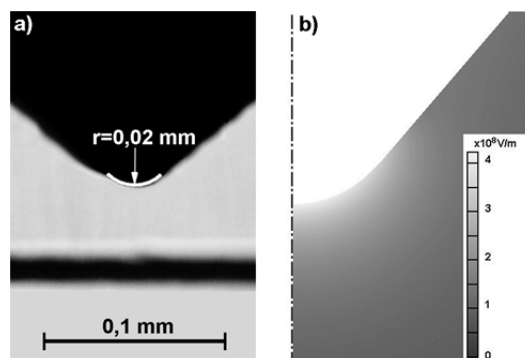
Z publikowanych wyników badań [7] płyną niepokojące doniesienia dotyczące zachowania się cieczy estrowych w silnym polu elektrycznym, które może prowadzić do powstawania wyładowań niezupełnych, np. osiągnięcie wartości ładunku pozornego 100 pC (w zdefiniowanym układzie elektrod ostrze - płyta) wymaga przyłożenia na igłę 27,9 kV w wypadku oleju mineralnego, ale zaledwie 15,5 kV w wypadku estru syntetycznego i 12,0 kV w wypadku estru naturalnego. Wyładowania niezupełne są powodem generowania gazów palnych, dlatego autorzy postanowili porównać intensywność generacji gazów w tych samych warunkach polowych dla omawianych cieczy.

Zaprojektowano układ, w którym wysoką wartość natężenia pola osiąga się na czubku igły. Układ jest konstrukcyjnie zbliżony do układu ostrze-płyta (rys. 2a), z tą różnicą że występuje uwarstwienie szeregowo dielektryków (badana ciecz i szklane dno pojemnika). Układ jest wyposażony w zawór trójdrożny umożliwiający pobranie próbki gazu z przestrzeni ponad powierzchnią cieczy. Aby wyeliminować wyładowania typu koronowego w powietrzu zaprojektowano elektrodę ochronną, która była umieszczona na nakrętce butelki (rys. 2b). Wykonano



Rys. 2. Pojemnik z badaną cieczą, zaworem trójdrożnym, igłą oraz elektrodą ochronną a), zmontowany układ, w którym poddawano cieczy narażeniu w postaci niejednorodnego pola elektrycznego

fotografię ostrza zastosowanej igły (z użyciem mikroskopu), na podstawie której wyznaczono promień jego krzywizny (rys. 3a). Następnie wyznaczono obraz pola elektrycznego w omawianym układzie (rys. 3a) i na jego podstawie obliczono maksymalną wartość pola elektrycznego występującą na końcu igły. Napięcie jakie panowało na ostrzu igły miało wartość skuteczną równą 75 kV. Ze względu na szeregowo uwarstwienie dielektryków (szkła i cieczy izolacyjnej) oraz różne wartości przenikalności elektrycznej oleju mineralnego ($\epsilon_w = 2,2$) i cieczy estrowych ($\epsilon_w = 3,1$) uzyskano różne wartości natężenia pola elektrycznego. W oleju mineralnym maksymalna wartość wynosiła $4,21 \cdot 10^8$ V/m, dla cieczy estrowych uzyskano niższą wartość równą $4,06 \cdot 10^8$ V/m. Zatem przy tym samym napięciu w oleju mineralnym w obszarze ostrza występuje wyższe natężenie pola elektrycznego niż w cieczach estrowych o około 3,7%.



Rys. 3. Zdjęcie mikroskopowe ostrza igły a), obraz natężenia pola elektrycznego w obszarze ostrza igły obliczone dla oleju mineralnego

Opis metodyki pomiaru zawartości gazów w badanych próbkach

Przedstawiona poniżej procedura umożliwiła przeprowadzenie badań porównawczych zawartości gazów w próbkach nowych oraz poddanych narażeniu polegającemu na wymuszeniu wyładowań niezupełnych w cieczy przy zastosowaniu układu, który przedstawiono w poprzednim punkcie. Ponieważ dla cieczy estrowych nie są jeszcze znane współczynniki podziału gazów w temperaturze innej niż 20 °C kondycjonowanie cieczy przeprowadzano właśnie w tej temperaturze. Procedura składała się z siedmiu punktów:

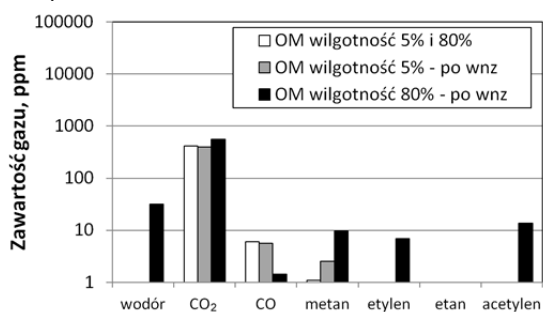
- spreparowanie nowych cieczy izolacyjnych w taki sposób aby uzyskać dwa poziomy zawilgocenia 5% i 80%,
- zamknięcie w szczelnych butelkach (1060 ml oleju i 75 ml powietrza) – rys. 2a,

- kondycjonowanie cieczy w temperaturze 20 °C przez 12 h po czym wyrównywano ciśnienie poprzez otwarcie zaworu,
- pobranie próbek powietrza (blank test DGA),
- podanie cieczy narażeniu polem elektrycznym w układzie jak na rysunku 2a (napięcie 75 kV przez 3 h),
- kondycjonowanie cieczy w temperaturze 20 °C przez 12 h (uzyskanie równowagi gazowej, wyrównanie ciśnienia),
- pobranie próbek gazu z nadłóżki oleju do badań DGA i przeprowadzenie analiz DGA.

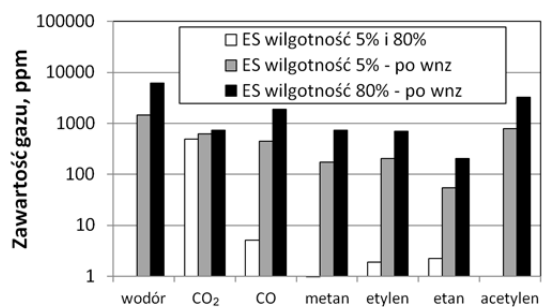
Ponieważ generowane w układzie gazy to w znaczącej mierze gazy palne kolejnym krokiem było sprawdzenie czy ich obecność wpłynie na temperaturę zapłonu par cieczy.

Wyniki badań

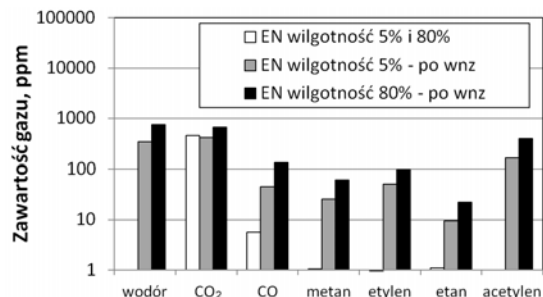
Na rysunkach 4, 5 i 6 przedstawiono wyniki badań zawartości gazów rozpuszczonych w oleju mineralnym (OM), w estrze syntetycznym (ES) i w estrze naturalnym (EN). Ciecze nie poddawane narażeniom niezależnie od stopnia zawilgocenia wykazywały podobne wartości stężeń gazów diagnostycznych, które można traktować jako pewien poziom odniesienia.



Rys.4. Zawartość gazów diagnostycznych wygenerowanych w oleju mineralnym o różnym stopniu zawilgocenia na skutek oddziaływania pola elektrycznego o natężeniu $4,21 \cdot 10^8$ V/m, w odniesieniu do cieczy nienarażonej



Rys.5. Zawartość gazów diagnostycznych, wygenerowanych w estrze syntetycznym o różnym stopniu zawilgocenia na skutek oddziaływania pola elektrycznego o natężeniu $4,06 \cdot 10^8$ V/m, w odniesieniu do cieczy nienarażonej



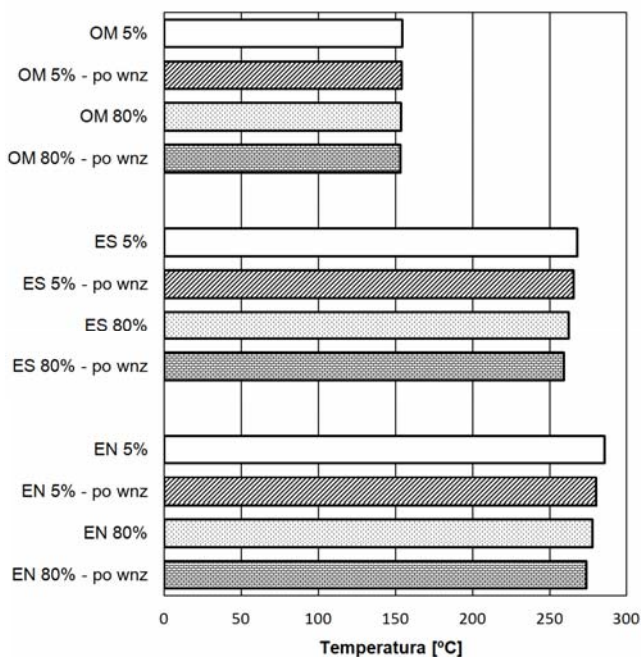
Rys.6. Zawartość gazów diagnostycznych, wygenerowanych w estrze naturalnym o różnym stopniu zawilgocenia na skutek oddziaływania pola elektrycznego o natężeniu $4,06 \cdot 10^8$ V/m, w odniesieniu do cieczy nienarażonej

Mimo najwyższej wartości natężenia pola elektrycznego panującego w oleju mineralnym ciecz ta wykazywała się najwyższą odpornością na tego typu narażenie. Wyładowania niepełne w oleju mineralnym były praktycznie niezauważalne, co przełożyło się na śladowe ilości wygenerowanych gazów w wypadku cieczy suchej. W wypadku oleju zawilgoczonego ilość generowanych gazów nieznacznie wzrosła (rys. 4).

Odmienne jakościowo zjawiska obserwowano w cieczech estrowych. Zarówno w estrze syntetycznym, jak i naturalnym, obserwowano intensywne wyładowania niepełne, przy czym w estrze syntetycznym ich intensywność była największa. Przełożyło się to na ilość i rodzaj gazów jakie powstawały w trakcie eksperymentu. Najwyższe stężenia wygenerowanych gazów zaobserwowano w estrze syntetycznym (rys. 5). Znaczne ilości obserwowano również w estrze naturalnym. W obu tych cieczech dominującym gazem był wodór. Obserwowano również znaczne ilości acetyleny, tlenku węgla, metanu i etylenu, przy czym w cieczech zawilgoczonych aktywność wyładowań była wyższa, co przełożyło się na ilość generowanych gazów.

Wszystkie z generowanych w znacznych ilościach gazów to gazy palne. Zachodziło zatem podejrzenie, że obecność gazów może wpływać na temperaturę zapłonu par cieczy.

Na rysunku 7 przedstawiono wyniki badań temperatury zapłonu cieczy elektroizolacyjnych nowych (suchych – 5% i zawilgoczonych – 80%) oraz cieczy poddanych oddziaływaniu wyładowań niepełnych (suchych – 5% i zawilgoczonych – 80%). Można zaobserwować, że we wszystkich wypadkach najwyższą temperaturą zapłonu odznaczał się ester naturalny, a najmniejszą olej mineralny. Temperatura zapłonu estru naturalnego charakteryzującego się niskim poziomem zawilgocenia (EN 5%) była o ponad 130 °C większa od temperatury zapłonu oleju mineralnego (OM 5%). Natomiast temperatura zapłonu estru syntetycznego (ES 5%) o ponad 110 °C przewyższała temperaturę zapłonu oleju mineralnego.



Rys.7. Temperatura zapłonu cieczy elektroizolacyjnych o różnym stopniu zawilgocenia, nowych oraz poddanych narażeniu w postaci wyładowań niepełnych

W tabeli 2 przedstawiono temperaturę zapłonu badanych cieczy elektroizolacyjnych wraz z wyznaczoną niepewnością pomiarową. Niepewność została wyznaczona na bazie odchylenia standardowego średniej arytmetycznej z uwzględnieniem współczynnika Studenta-Fishera dla 4 stopni swobody i poziomu ufności 95%. Określenie niepewności pomiarowej jest niezbędne, ponieważ obserwowane różnice wartości temperatury zapłonu są nieznaczne i nie zawsze statystycznie istotne.

Analizując wpływ zawilgocenia na wartość temperatury zapłonu można zauważyć, że ciecze estrowe charakteryzujące się wysokim poziomem zawilgocenia bezwzględnie odznaczały się niższą temperaturą zapłonu w porównaniu z cieczami suchymi. W przypadku oleju mineralnego, w którym zawartość wody jest na znacznie niższym poziomie niż w estrach nie zaobserwowano istotnych statystycznie różnic.

Tabela 2. Wyniki badań temperatury zapłonu cieczy elektroizolacyjnych o różnym stopniu zawilgocenia, nowych oraz poddanych działaniu wylądowań niezupełnych (po wnz); OM – olej mineralny, ES – ester syntetyczny, EN – ester naturalny

Rodzaj cieczy	Temperatura zapłonu [°C]
OM 5%	154 ± 2
OM 5% - po wnz	154 ± 2
OM 80%	154 ± 2
OM 80% - po wnz	153 ± 2
ES 5%	268 ± 1
ES 5% - po wnz	266 ± 2
ES 80%	262 ± 3
ES 80% - po wnz	259 ± 2
EN 5%	286 ± 2
EN 5% - po wnz	280 ± 2
EN 80%	278 ± 2
EN 80% - po wnz	274 ± 2

Biorąc pod uwagę wpływ obecności gazów palnych na wartość temperatury zapłonu można stwierdzić, że jest on statystycznie istotny dla estru naturalnego zarówno suchego jak i zawilgoconego, przy czym w każdym z tych wypadków obserwowano obniżenie temperatury zapłonu par cieczy.

W wypadku estru naturalnego zawilgoconego temperatura zapłonu zmniejszyła się o 4 °C przy maksymalnej błędzie pomiaru ± 2 °C. Większą różnicę zaobserwowano dla cieczy suchej, dla której obniżenie temperatury zapłonu wynosiło 6 °C przy tej samej niepewności pomiaru. Jest to zasadniczo niewielkie obniżenie wartości temperatury zapłonu par, biorąc pod uwagę wartości temperatury zapłonu innych badanych cieczy.

Należy zauważyć, że podawane przez różnych badaczy i producenta wartości temperatury zapłonu często różnią się dość znacznie między sobą. Podczas badań przeprowadzonych w naszym laboratorium uzyskano wyniki powtarzalne, jednak znacznie niższe niż deklarowane przez producenta (tabela 1).

Podsumowanie

Sklasyfikowanie cieczy izolacyjnych pod względem ogniodporności wymaga uwzględnienia szeregu wielkości. Do najistotniejszych z nich należą temperatura zapłonu, temperatura palenia oraz dolna wartość opałowa. Biorąc pod uwagę wymienione właściwości zastosowanie estrów w miejsce stosowanego dotąd oleju mineralnego wydaje się być w pełni uzasadnione z punktu widzenia bezpieczeństwa pożarowego. Dodatkowo na korzyść estrów przemawia fakt,

że nawet w przypadku zapłonu rozpylonej substancji ogień ulega samozgaszeniu. Ponadto, w dymie nie występują związki toksyczne.

Spośród analizowanych cieczy elektroizolacyjnych najwyższą temperaturą zapłonu charakteryzował się ester naturalny. Jednakże wartość ta była znacznie mniejsza od wartości deklarowanej przez producenta.

Mimo różnic, jakie podają różne ośrodki badawcze odnośnie do wartości temperatury zapłonu cieczy elektroizolacyjnych, można stwierdzić, że estry syntetyczne i naturalne charakteryzują się stosunkowo wysoką wartością tego parametru.

Woda rozpuszczona w cieczy elektroizolacyjnej wpływa na wartość temperatury zapłonu, co w przypadku cieczy o dużej względnej zawartości wody może przekładać się na obniżenie temperatury zapłonu.

Mimo najwyższych zaobserwowanych stężeń gazów w estrze syntetycznym nie stwierdzono statystycznie i eksploatacyjnie istotnych różnic temperatury zapłonu par tej cieczy. Z kolei w przypadku estru naturalnego, mimo mniejszych stężeń gazów, stwierdzono ich istotną statystycznie zmianę temperatury zapłonu między cieczą nową i poddaną oddziaływaniu wylądowań niezupełnych. Można zatem stwierdzić, że generacja gazów palnych w wyniku aktywności wylądowań niezupełnych w estrze naturalnym może przekładać się na obniżenie temperatury zapłonu tej cieczy.

Praca sfinansowana ze środków przekazanych przez MNiSzW na działalność statutową nr 04/41/DS-MK/4241, nazwa zadania: „Oznaczanie temperatury zapłonu cieczy elektroizolacyjnych wykorzystywanych w urządzeniach elektroenergetycznych”

Autorzy: dr inż. Grzegorz Dombek, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: grzegorz.dombek@put.poznan.pl; dr hab. inż. Jarosław Gielniak, Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, ul. Piotrowo 3a, 60-965 Poznań, E-mail: jaroslaw.gielniak@put.poznan.pl.

LITERATURA

- [1] Experience in service with new insulating liquids, *Cigre Brochure 436*, (2010)
- [2] Oommen T.V., Vegetable oils for liquid – filled transformers, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 18 (2002), n.1, 6-11
- [3] Longva K., Natural ester distribution transformers; improved reliability and environmental safety, *Nordic Insulation Sympos.*, Trondheim, (2005), 293-295
- [4] Dombek G., Wykorzystanie alternatywnych cieczy elektroizolacyjnych w kontekście minimalizacji zagrożenia pożarowego transformatorów energetycznych, *Przegląd Naukowo-Metodyczny. Edukacja dla bezpieczeństwa*, 30 (2016), nr 1, 857-865
- [5] PN-EN 61100, Klasyfikacja cieczy elektroizolacyjnych według temperatury palenia i dolnej wartości opałowej
- [6] PN-EN ISO 2719, Oznaczanie temperatury zapłonu. Metoda zamkniętego tygla Pensky'ego-Martensa
- [7] Khan I.U., Wang Z., Cotton I., Northcote S., Dissolved gas analysis of alternative fluids for power transformers, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 23 (2007), n.5, 5-14
- [8] IEEE Guide for interpretation of gases generated in natural ester and synthetic ester – immersed transformers, New York, (2014)
- [9] Olej Nytro Draco, specyfikacja ogólna, NYNAS, 2014
- [10] Midel 7131, Synthetic Ester Transformer Fluid, M&I Materials, 2016
- [11] Envirotemp® FR3™ FLUID, Product Information, Bulletin 00092, June 2001