

Grzegorz DOMBEK*
Zbigniew NADOLNY*
Piotr PRZYBYŁEK*

PORÓWNANIE ESTRÓW NATURALNYCH I OLEJÓW MINERALNYCH W ASPEKTCIE WYKORZYSTANIA W TRANSFORMATORACH ENERGETYCZNYCH WYSOKICH NAPIĘĆ

Artykuł przedstawia porównanie estrów naturalnych i olejów mineralnych w kontekście wykorzystania ich w transformatorach energetycznych wysokiego napięcia. Składa się z czterech rozdziałów. Pierwszy rozdział stanowi wstęp. W drugim rozdziale przedstawiono funkcje, jakie pełnią cieczy elektroizolacyjne w urządzeniach elektroenergetycznych. Rozdział trzeci poświęcony jest porównaniu właściwości elektrycznych, termicznych oraz środowiskowych zestawionych w artykule cieczy elektroizolacyjnych. Artykuł zakończony jest podsumowaniem.

1. WPROWADZENIE

Od ponad stu lat oleje mineralne, ze względu na swoje liczne pozytywne właściwości i bardzo dobre rozpoznanie, powszechnie stosowane są w transformatorach. Ostatnimi czasy istotną rolę zaczynają odgrywać właściwości środowiskowe cieczy elektroizolacyjnych. Z tego też względu kilkanaście lat temu pojawiła się koncepcja wykorzystania w transformatorach estrów naturalnych. Estry te, jak każda inna ciecz elektroizolacyjna, muszą spełniać określone funkcje oraz wykazywać się określonymi właściwościami fizycznymi, elektrycznymi, cieplnymi i środowiskowymi. Niniejszy artykuł poświęcony jest porównaniu estrów naturalnych i olejów mineralnych w kontekście stosowania ich w transformatorach wysokiego napięcia.

2. FUNKCJE CIECZY ELEKTROIZOLACYJNYCH

Ze względu na swoje właściwości cieczy elektroizolacyjne są powszechnie stosowane w elektroenergetyce. Wykorzystuje się je zarówno w transformatorach, jak i w kondensatorach, łącznikach oraz kablach wysokonapięciowych.

* Politechnika Poznańska.

Podstawowymi zadaniami oleju transformatorowego jest skuteczne odprowadzanie ciepła oraz zapewnienie dobrej izolacji elektrycznej. Ponadto, ograniczają one wylądowania niezupełne, chronią przed powietrzem i wilgocią, a także poprawiają wytrzymałość elektryczną izolacji celulozowej poprzez jej impregnację (nasycanie) [1, 2]. W przypadku kondensatorów ciecz elektroizolacyjne mają za zadanie zapewnienie dużej przenikalności elektrycznej ϵ oraz izolacji elektrycznej na odpowiednio wysokim poziomie. Pełnią również funkcje chłodziwa oraz ochrony przed wilgocią. Wykorzystuje się je również w łącznikach, w których są czynnikami ułatwiającymi gaszenie łuku elektrycznego. Stosowanie cieczy elektroizolacyjnych w kablach wysokonapięciowych podyktowane jest potrzebą zapewnienia odpowiedniej izolacji elektrycznej, impregnacji oraz chłodzenia.

3. WŁAŚCIWOŚCI OLEJÓW MINERALNYCH I ESTRÓW NATURALNYCH

3.1. Wprowadzenie

Ciecze izolacyjne opisywane są poprzez ich właściwości elektryczne, cieplne, środowiskowe i fizyczne. Zastosowanie w urządzeniach odpowiednich cieczy elektroizolacyjnych wynika z licznych badań, a także doświadczeń technologicznych i eksploatacyjnych zdobywanych przez określony czas. W związku z tym istnieje konieczność przeprowadzenia dokładnych badań nowo stosowanych cieczy elektroizolacyjnych, do których zaliczane są estry naturalne, mających na celu określenie wyżej wymienionych właściwości.

3.2. Właściwości elektryczne

W niniejszym podrozdziale omówione zostały podstawowe właściwości elektryczne estrów naturalnych i olejów mineralnych. Porównana została przenikalność elektryczna, współczynnik stratności dielektrycznej $tg\delta$, wytrzymałość elektryczna oraz rezystywność zestawionych w artykule cieczy elektroizolacyjnych.

Względna przenikalność elektryczna estrów naturalnych jest wyższa od przenikalności elektrycznej oleju mineralnego. W przypadku estrów naturalnych wynosi ona 3,2, zaś dla oleju mineralnego 2,2 [3]. Ma to szczególne znaczenie w przypadku współpracy cieczy elektroizolacyjnej z papierem, którego przenikalność jest większa, bądź równa 4. Im większa różnica przenikalności dwóch materiałów izolacyjnych, tym większa nierównomierność rozkładu natężenia pola elektrycznego, co może negatywnie wpłynąć na pracę urządzenia. Oznacza to, że w przypadku estrów naturalnych, rozkład natężenia pola

elektrycznego będzie bardziej równomierny. W rezultacie zmniejsza się prawdopodobieństwo przeskoku w cieczy, co spowalnia proces starzenia się izolacji. Ma to kluczowe znaczenie, gdyż ciecze elektroizolacyjne charakteryzują się mniejszą wytrzymałością elektryczną niż papier zaimpregnowany cieczą.

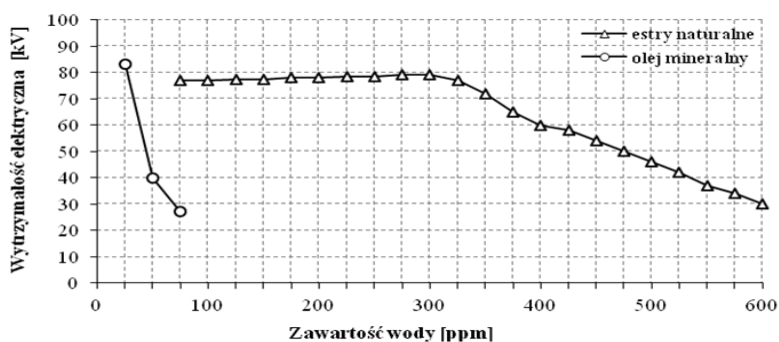
Oleje mineralne charakteryzują się niskim współczynnikiem strat dielektrycznych ($tg\delta$), którego wartość jest mniejsza niż 0,002. Z kolei, w przypadku estrów naturalnych współczynnik ten odznacza się znacznie większą wartością, mieszczącą się w zakresie $0,005 \div 0,014$ [3]. Skutkiem tego wzrastają straty dielektryczne w estrach naturalnych. Tak wysoka wartość $tg\delta$ negatywnie wpływa na procesy starzeniowe zachodzące w urządzeniach elektrycznych.

Kolejnym istotnym parametrem elektrycznym charakteryzującym ciecze elektroizolacyjne jest wytrzymałość elektryczna dla napięcia przemiennego. W układzie elektrod, których odległość wynosi 2,5 mm wytrzymałość elektryczna estrów naturalnych wynosi 75 kV podczas, gdy dla olejów mineralnych wartość ta jest niższa i wynosi 70 kV. W układzie elektrod, których odległość wynosi 2 mm, wytrzymałość elektryczna estrów naturalnych równa jest 76 kV, co w przypadku wytrzymałości elektrycznej olejów mineralnych wynoszącej 60 kV stanowi znaczną różnicę [3, 4, 5]. Można zatem stwierdzić, że niezależnie od odległości między elektrodami, wytrzymałość elektryczna estrów naturalnych jest większa od wytrzymałości olejów mineralnych.

Na rysunku 1 przedstawiono wykres zależności wytrzymałości elektrycznej dla napięcia przemiennego cieczy elektroizolacyjnych w zależności od ich stopnia zawilgocenia. Można wyraźnie zauważyć, że nawet niewielka ilość wody w oleju mineralnym powoduje znaczące pogorszenie jego wytrzymałości elektrycznej. W przeciwieństwie do olejów mineralnych estry naturalne wykazują znacznie większą rozpuszczalność wody, wynikającą z ich polarnej budowy. Wraz ze wzrostem zawartości wody (do około 300 ppm) wytrzymałość elektryczna estrów naturalnych jest jeszcze na stałym, wysokim poziomie. Natomiast w przypadku olejów mineralnych, wzrost zawilgocenia do 80 ppm powoduje spadek wytrzymałości elektrycznej o kilkadziesiąt procent.

Napięcie przeskoku estrów naturalnych dla napięcia udarowego jest mniejsze niż dla oleju mineralnego. Wartość impulsowego napięcia przeskoku w przypadku oleju mineralnego, przy stosowaniu metody 1 strzał/krok, wynosi 276,4 kV. Dla estrów naturalnych wartość ta równa jest 239,3 kV. Z kolei wartości impulsowego napięcia przeskoku przy zastosowaniu metody 3 strzały/krok są mniejsze dla obu badanych cieczy i wynoszą odpowiednio 251,9 kV – dla oleju mineralnego, oraz 200,4 kV dla estrów naturalnych [3].

Napięcie przebicia papieru celulozowego o grubości 90 μm impregnowanego estrem naturalnym wynosi około 8 kV i jest nieznacznie większe niż w przypadku papieru impregnowanego olejem mineralnym (7,5 kV) [6]. Różnice te mogą być jednak zniwelowane w przypadku uwarstwienia układu izolacyjnego, tzn. papier impregnowany – olej na skutek „gry” przenikalności elektrycznej.



Rys. 1. Wytrzymałość elektryczna wybranych cieczy elektroizolacyjnych w zależności od ich stopnia zawilgocenia [3]

Napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych (wnz) w estrach naturalnych i oleju mineralnym, w zależności od metody wyznaczania, nieznacznie się od siebie różni. Według metody IEC 1294 napięcie zapłonu wnz w oleju mineralnym wynosi 38,2 kV, natomiast w przypadku estrów naturalnych wartość ta jest nieco mniejsza i wynosi 34 kV. Kierując się zmodyfikowaną metodą IEC 1294 napięcie zapłonu wnz w oleju mineralnym wynosi 23,2 kV, w estrach naturalnych 25,6 kV [3].

Rezystywność oleju mineralnego wynosi 10^{10} - 10^{16} Ω cm, natomiast rezystywność estrów naturalnych 10^{10} - 10^{14} Ω cm [3]. Oznacza to, że biorąc pod uwagę rezystywność, olej mineralny okazuje się materiałem lepszym.

Trudno jest jednoznacznie stwierdzić, która z przedstawionych cieczy elektroizolacyjnych, ze względu na swoje właściwości elektryczne, jest cieczą bardziej pożądaną. Zarówno olej mineralny, jak i estry naturalne wykazują odmienne właściwości elektryczne, które są istotne z punktu widzenia zastosowania omawianych cieczy w transformatorach.

3.3. Właściwości termiczne

W podrozdziale opisane zostały właściwości termiczne przedstawionych w artykule cieczy elektroizolacyjnych. Omówiona została lepkość, przewodność cieplna oraz rozszerzalność cieplna olejów mineralnych i estrów naturalnych. Wielkości te w zasadniczy sposób wpływają na współczynnik przejmowania ciepła α , który jest kluczowy z punktu widzenia oddawania ciepła do otoczenia.

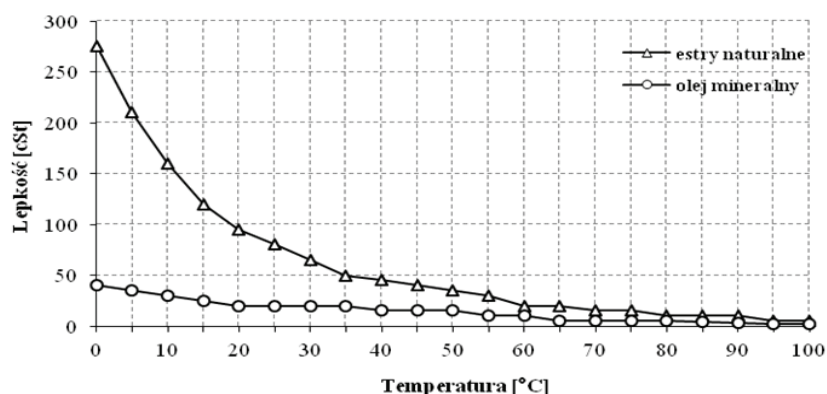
Zasadniczą wadą estrów naturalnych, warunkującą ich zdolność do transportu ciepła, a także determinującą cieplne zachowanie się transformatorów, jest ich duża lepkość kinematyczna. Na rysunku 2 przedstawiono zależność lepkości estrów naturalnych i olejów mineralnych od temperatury. Jak wynika z rysunku, w zakresie temperatury od 0 do 20°C lepkość estrów naturalnych jest od 4 do 7 razy większa niż lepkość olejów mineralnych. Ponadto, w tym zakresie temperatury

estry naturalne tracą płynność [7]. W przypadku wysokiej temperatury ($>50^{\circ}\text{C}$) lepkość obu cieczy jest zbliżona. Znaczna lepkość estrów naturalnych, w porównaniu z olejami mineralnymi (tab.1), wpływa na zmniejszenie efektywności chłodzenia transformatora wypełnionego estrami. Skutkiem tego jest podwyższenie temperatury wewnątrz transformatora, a przede wszystkim jego najgorętszego miejsca (ang. *hot spot*). Jest to szczególnie istotne w przypadku transformatorów dużej mocy.

Kolejną właściwością, mającą wpływ na współczynnik przejmowania ciepła α , jest przewodność cieplna. Analizując tabelę 1 można zauważyć, że estry naturalne, w przeciwieństwie do olejów mineralnych, charakteryzują się dużo większym współczynnikiem przewodności cieplnej właściwej dla temperatury 20°C .

Estry naturalne, w porównaniu do olejów mineralnych, charakteryzują się podobnym, często nawet mniejszym, współczynnikiem rozszerzalności cieplnej. Z tego też względu mogą być one stosowane do kadzi wykorzystywanych w przypadku olejów mineralnych.

Pozostałe właściwości termiczne zestawionych cieczy elektroizolacyjnych, tj. gęstość i ciepło właściwe, są do siebie zbliżone.



Rys. 2. Lepkość wybranych cieczy elektroizolacyjnych w funkcji temperatury [3]

Tabela 1. Wybrane właściwości termiczne olejów mineralnych i estrów naturalnych [3]

Właściwość	Olej mineralny	Ester naturalny
Przewodność cieplna w 20°C [$\text{W}/\text{kg}\cdot\text{K}$]	0,126	0,160 – 0,167
Ciepło właściwe w 20°C [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$]	1860	1883-1943
Współczynnik rozszerzalności cieplnej [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]	0,00075	0,00068 – 0,00074
Lepkość kinematyczna w 0°C [mm^2/s]	37,5	207 – 276
Lepkość kinematyczna w 20°C [mm^2/s]	22	78 – 97
Lepkość kinematyczna w 40°C [mm^2/s]	9	36 – 42
Lepkość kinematyczna w 100°C [mm^2/s]	2,6	8 – 9
Gęstość w 20°C [kg/m^3]	880	910 – 920

Podsumowując przedstawione w podrozdziale właściwości termiczne olejów mineralnych i estrów naturalnych można stwierdzić, że nie jest możliwe dokładne sprecyzowanie, która z analizowanych cieczy odznacza się bardziej pożądanymi właściwościami cieplnymi. Duża lepkość estrów naturalnych, w porównaniu z olejami mineralnymi, może być rekompensowana znacznie większą przewodnością cieplną estrów naturalnych.

3.4. Właściwości środowiskowe

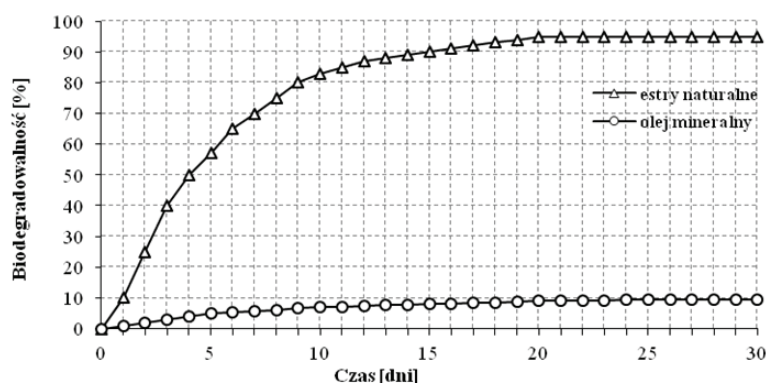
W podrozdziale omówione zostały właściwości środowiskowe estrów naturalnych i olejów mineralnych w perspektywie wykorzystania ich w transformatorach energetycznych wysokich napięć. Zestawione cieczy elektroizolacyjne przeanalizowane zostały pod kątem łatwości pozyskiwania, biodegradowalności oraz temperatury zapłonu i samozapłonu. Przeprowadzona analiza porównawcza przedstawiona została poniżej.

Oleje mineralne pozyskiwane są w wyniku destylacji ropy naftowej, której zasoby ulegają znaczącemu wyczerpaniu. Z kolei estry naturalne otrzymywane są z nasion, owoców, kielków i innych surowców pochodzących z roślin oleistych. Rośliny te w swoim naturalnym cyklu wzrostu produkują estry. Do celów elektroizolacyjnych wykorzystuje się przede wszystkim oleje słonecznikowe, sojowe i rzepakowe [3]. Oznacza to, że w porównaniu z olejami mineralnymi, estry naturalne charakteryzują się znacznie większą łatwością pozyskiwania.

Bezpieczeństwo środowiska naturalnego związane jest z biodegradowalnością i toksycznością stosowanych cieczy elektroizolacyjnych. Ze względu na swoją budowę estry naturalne znacznie przewyższają oleje mineralne pod względem biodegradowalności. Zapewniają też wysoki stopień ochrony przed skażeniem ziemi i wody [8, 9]. Na rysunku 3 przedstawiono zależność stopnia biodegradowalności estrów naturalnych i olejów mineralnych w zależności od czasu. Analizując wykres można zauważyć, że po 15 dniach biodegradowalność estrów naturalnych osiąga poziom 90%, natomiast w przypadku olejów mineralnych nie przekracza 10%.

Kolejnym aspektem przemawiającym za stosowaniem estrów naturalnych w transformatorach energetycznych wysokiego napięcia jest minimalizacja zagrożeń pożarowych [8, 9]. Wysoka temperatura zapłonu ($>300^{\circ}\text{C}$) i samozapłonu ($>350^{\circ}\text{C}$) estrów naturalnych w przeciwieństwie do temperatury zapłonu ($160\text{--}170^{\circ}\text{C}$) i samozapłonu ($170\text{--}180^{\circ}\text{C}$) oleju mineralnego wpływa na wzrost bezpieczeństwa przeciwpożarowego [3]. Niska temperatura zapłonu oleju mineralnego była w przeszłości niejednokrotnie przyczyną wybuchu i pożaru transformatora. Skutkiem tego były duże straty materialne, skażenie gleby i wód gruntowych, toksyczne opary dymu, wzrost zagrożenia dla ludzi, wysoka cena transformatora zakupionego w trybie awaryjnym oraz przerwa w dostawie i odszkodowania za niedostarczoną energię elektryczną. Zastosowanie estrów

naturalnych jako cieczy elektroizolacyjnej praktycznie wyklucza możliwość pożaru transformatora, podnosząc jednocześnie poziom bezpieczeństwa zarówno samego urządzenia, jak i personelu technicznego. Co więcej, estry naturalne wykazują mniejszą opalową wartość kaloryczną (36,9 MJ/kg) w porównaniu z olejami mineralnymi (około 46 MJ/kg) [3].



Rys. 3. Stopień biodegradowalności estrów naturalnych i olejów mineralnych w funkcji czasu [3]

Zważając na coraz bardziej rygorystyczne wymagania dotyczące ochrony środowiska i bezpieczeństwa pożarowego estry naturalne, w porównaniu z olejami mineralnymi, wykazują znacznie lepsze właściwości środowiskowe. Wyróżnia je bardzo dobra biodegradowalność, mała toksyczność oraz łatwość pozyskiwania.

4. PODSUMOWANIE

Porównanie właściwości estrów naturalnych i olejów mineralnych jest istotne z punktu widzenia stosowania estrów w transformatorach wysokiego napięcia. Nielatwym zadaniem jest jednoznaczne wskazanie, która z omawianych w artykule cieczy elektroizolacyjnych mniej lub bardziej nadaje się do stosowania w transformatorach. Estry naturalne i oleje mineralne wykazują szereg pożądanych właściwości, niestety nie są wolne od wad. Niewątpliwie na korzyść estrów naturalnych przemawiają aspekty środowiskowe, przez co wzrasta zainteresowanie tymi cieczami.

LITERATURA

- [1] Flisowski Z., Technika Wysokich Napięć, WNT, Warszawa, 1988.
- [2] Gacek Z., Wysokonapięciowa technika izolacyjna, Wyd. Pol. Śl, Gliwice, 1996.
- [3] CIGRE Working Group A2.35, Experiences in service with new insulating liquids, CIGRE Brochure No 436, October 2010.

- [4] Lance Lewand, Doble Engineering, Understanding water in transformer system, Neta World report, 2002.
- [5] R. Martin, Internal Technical Report, M&I Materials, Hibernia Way, Trafford Park, Manchester.
- [6] Martin D., Wang Z.D., Dyer P., Darwin A.W., James I.R., A Comparative Study of the Dielectric Strength of Ester Impregnated Cellulose for Use in Large Power Transformers, ICSD Winchester, UK, 2007.
- [7] Fleszyński J., Właściwości olejów roślinnych w aspekcie zastosowania w transformatorach energetycznych, Międzynarodowa Konferencja Transformatorowa Transformator 2011, Toruń, 2011.
- [8] Oommen T.V., Vegetable oils for liquid – filled transformers, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 18, No.1, pp. 6-11, 2002.
- [9] Longva K., Natural ester distribution transformers; improved reliability and environmental safety, Nordic Insulation Sympos., pp. 293-295, Trondheim, 2005.

**THE COMPARISON OF NATURAL ESTERS AND MINERAL OILS
IN THE CONTEXT OF THEIR USING IN THE HIGH
VOLTAGE POWER TRANSFORMERS**

This paper presents a comparison of natural esters and mineral oils within the context of their use in high-voltage power transformers. It consists of four chapters. The first chapter is an introduction. The second chapter describes the functions that insulating fluids perform in electrical equipment. The third chapter is devoted to the comparison of electrical, thermal and environmental properties of insulating fluids compiled in the article. Article ends with a summary.