

Carl P. Wolmarans, René Abrahams, Bruce Pahlavanpour
NYNAS AB Sweden

Biodegradowalne płyny izolacyjne na bazie węglowodorów o niskiej lepkości

Biodegradable electroinsulating fluids based on low viscosity hydrocarbons

W artykule został omówiony olej izolacyjny NYTRO BIO 300X, oparty na biopochodnych węglowodorach, charakteryzujący się niską lepkością i jednocześnie łatwo ulegający biodegradacji. Omawiany olej ma kilka kluczowych zalet, w tym: biodegradowalność, ulepszone odprowadzanie ciepła i wysoką stabilność oksydacyjną. Zalety te stają się szczególnie ważne w przypadku infrastruktury energetycznej zlokalizowanej w pobliżu wrażliwych środowisk, np. morskich farm wiatrowych. NYTRO BIO 300X jest klasyfikowany jako łatwo ulegający biodegradacji zgodnie z OECD 301F i jest olejem z inhibitorami spełniającym wymagania normy IEC 60296.

Słowa kluczowe: olej izolacyjny NYTRO BIO 300X, biodegradowalność, optymalizacja termiczna, wysoka stabilność oksydacyjna, trwałość

Described is here the NYTRO BIO 300X insulating oil based on bio-derived hydrocarbons characterized by low viscosity and, at the same time, easily biodegradable. The presented oil has some key advantages including biodegradability, improved heat dissipation and high oxidative stability. These advantages become particularly important in the case of power infrastructure placed in vicinity of sensitive environments like offshore wind farms. NYTRO BIO 300X is classified as the easily biodegradable one in accordance with OECD 301F and is an oil with inhibitors meeting the IEC 60296 standard requirements.

Keywords: NYTRO BIO 300X insulating oil, biodegradability, thermal optimization, high oxidative stability, durability

Wstęp

W artykule przedstawiono biopochodny płyn izolacyjny, skupiając się na trzech kluczowych obszarach: optymalizacji termicznej, impregnacji izolacji i trwałości. Lepkość cieczy izolacyjnej odgrywa kluczową rolę w termicznej charakterystyce transformatora mocy. Ogólnie rzecz biorąc, olej o niskiej lepkości powoduje lepsze ogólne chłodzenie w transformatorze mocy. Konwekcja – szczególnie konwekcja naturalna, która jest ważna w transformatorach z chłodzeniem olejowo-naturalnym (ON) – prawie całkowicie zależy od lepkości cieczy. Ostatecznie transformator może zostać przeciążony – bez znaczącego wzrostu temperatury punktu gorącego. Dzięki lepszemu przenoszeniu ciepła przez ciecz istnieje również możliwość optymalizacji konstrukcji. Lepkość ma również wpływ na impregnację papieru izolacyjnego – oleje o niższej lepkości wymagają krótszego czasu impregnacji – jest to ważny aspekt praktyczny związany z ryzykiem powstawania pęcherzyków powietrza w izolacji.

Ponadto aspekty, takie jak biodegradowalność i toksyczność stają się szczególnie ważne w przypadku infrastruktury energetycznej zlokalizowanej w pobliżu wrażliwych środowisk, np. morskich farm wiatrowych. Obecnie naturalne estry są najczęściej wybierane, gdy pożądana jest biodegradowalność, jednak wiążą się one z kilkoma wadami – w tym wyższą lepkością, różnymi wymaganiami dotyczącymi konstrukcji dielektrycznych i niską stabilnością oksydacyjną.

Omawiany w artykule olej izolacyjny NYTRO BIO 300X na bazie węglowodorów o niskiej lepkości ma kilka kluczowych zalet, w tym biodegradowalność, ulepszone odprowadzanie ciepła i wysoką stabilność oksydacyjną. Zachowuje on jednocześnie wiele podobieństw do powszechnie stosowanych mineralnych olejów izolacyjnych w zakresie fizykochemii (węglowodory), a tym samym wiele innych parametrów projektowych.

Wprowadzenie

Większość transformatorów energetycznych na świecie jest wypełniona olejem mineralnym, który służy dwóm podstawowym celom – izolacji i chłodzeniu. W obu Amerykach powszechnie stosuje się olej mineralny zgodny z normą ASTM D3487, a w pozostałych częściach świata głównie z normą IEC 60296. Historycznie takie oleje mineralne spełniające wcześniejsze odpowiedniki normowe składały się głównie z rafinowanych destylatów naftenowych i w mniejszym stopniu z destylatów parafinowych. Techniki rafinacji stosowane do produkcji takich cieczy były początkowo oparte na ekstrakcji rozpuszczalnikami i obróbce kwaśnym glinem, ale w późniejszych latach (późne lata 80.) surowa obróbka hydrotreatingowa była bardziej powszechna. Obecnie jest to główna technika rafinacji olejów mineralnych do zastosowań izolacyjnych.

Alternatywne ciecze, takie jak polichlorowane bifenyle (PCB), płyny silikonowe, estry syntetyczne i estry naturalne były również stosowane w transformatorach mocy wypełnionych olejem. PCB są najbardziej znane z powodu poważnych problemów bezpieczeństwa i dla zdrowia, stały się problemem na całym świecie i obecnie są stopniowo wycofywane. Obecnie większość olejów mineralnych to oleje naftenowe, przy czym stosuje się również niektóre oleje parafinowe. W niektórych zastosowaniach wykorzystuje się również transformatory wypełnione estrami syntetycznymi i naturalnymi.

Dostęp zarówno do mineralnych olejów izolacyjnych jak i płynów na bazie estrów powoduje, że producent transformatorów lub użytkownik końcowy przyjmuje pogląd, że „olej to olej”. Niemniej jednak, nawet w obrębie cieczy sprzedawanych zgodnie z określoną normą (taką jak IEC 60296) może istnieć kilka różnych produktów, z których każdy ma inne właściwości, a w konsekwencji inne wartości graniczne. Różnice te stają się oczywiście większe, gdy porównuje się płyny o znacząco różnym składzie chemicznym (np. pomiędzy olejami mineralnymi a płynami estrowymi). W związku z tym istotne jest, aby przy wyborze materiałów stosowanych w transformatorze, optymalizacji jego konstrukcji i ocenie całkowitego kosztu produkcji, brać pod uwagę wpływ cieczy izolacyjnej. Ponadto, należy również wziąć pod uwagę wpływ cieczy na środowisko, zwłaszcza gdy dana jednostka jest zlokalizowana we wrażliwym środowisku (np. na morzu).

W niniejszym artykule zostanie omówiony produkt NYTRO BIO 300X – oparty na biopochodnych węglowodorach, charakteryzujący się niską lepkością i jednocześnie łatwo ulegający biodegradacji.

Chłodzenie

Czynnikiem decydującym o mocy znamionowej transformatora jest głównie wzrost temperatury uzwojenia i oleju w stanie ustalonym (patrz IEC 60076-2). W związku z tym, efektywność chłodzenia transformatora jest ważnym elementem jego konstrukcji. Chłodzenie olejowo-naturalne (ON) oraz olejowo-wymuszone (OF) są najczęściej stosowanymi obecnie metodami, a w obu przypadkach kluczowym parametrem cieczy wpływającym na wymianę ciepła jest lepkość kinematyczna.

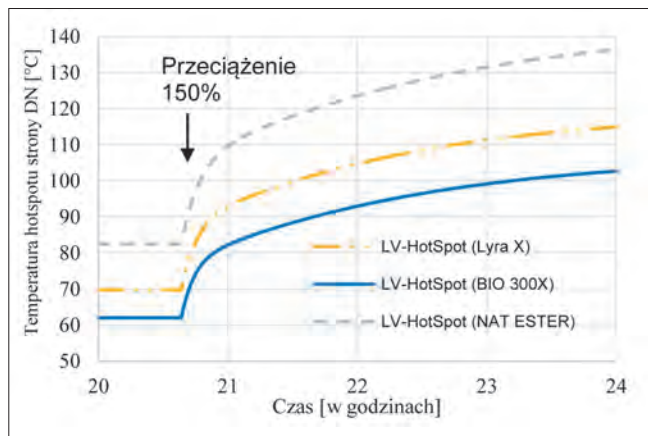
W tabeli 1 podano przykładowe lepkości różnych produktów. Dla porównania przedstawiono NYTRO BIO 300X (węglowodór pochodzenia biologicznego), NYTRO Lyra X (olej naftenowy) oraz popularny naturalny ester na bazie soi.

Tabela 1

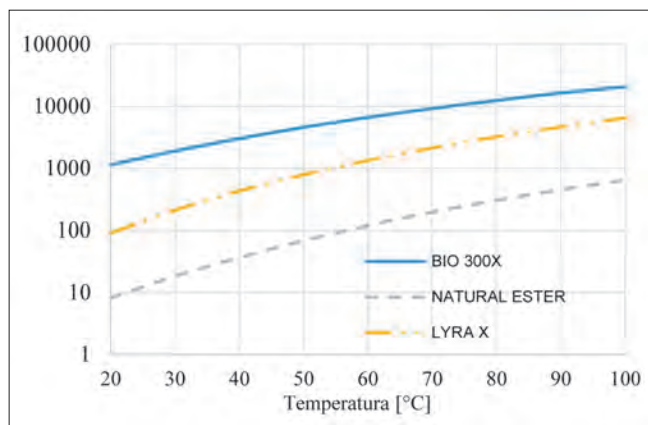
Typowe lepkości kinematyczne i gęstości dla różnych cieczy izolacyjnych

Temperatura	Lepkość kinematyczna, cSt			
	NYTRO BIO 300X	NYTRO LYRA X	NATURAL ESTER	SYNTHETIC ESTER
20°C	6,13	20,66	73	75
40°C	3,77	9,57	35	29,5
100°C	1,44	2,45	8	5,3
Gęstość w 20°C, kg/dm ³	0,785	0,870	0,920	0,968

Jedną z głównych wad cieczy estrowych jest ich wysoka lepkość, która prowadzi do ograniczenia chłodzenia, a tym samym do wyższych temperatur uzwojenia i oleju.



Rys. 1. Symulowany hotspot uzwojenia dolnego napięcia DN – na podstawie pracy i modeli opracowanych w [1] – transformator 250 MVA ONAF z tym samym obciążeniem i warunkami otoczenia zastosowanymi dla wszystkich przypadków cieczy. Różnica w lepkości prowadzi przede wszystkim do różnicy w chłodzeniu



Rys. 2. Liczba Grashofa (Gr) (podzielona przez 10⁶) obliczona dla zakresu temperatur 20-100°C dla NYTRO BIO 300X, NATURAL ESTER i LYRA X. Rosnąca liczba Grashofa wskazuje na większy przepływ w wyniku konwekcji naturalnej

Na rysunku 1 przedstawiono wyniki symulacji CFD (obliczeniowa dynamika płynów) opartej na modelu opracowanym przez Susa [1]. Porównywane są trzy wyżej wymienione ciecze, przy czym wszystkie pozostałe elementy modelu (w tym parametry transformatora, obciążenie i warunki otoczenia) pozostają niezmiennie w każdym przypadku. Symulacja jest ustawiona na obciążenie znamionowe transformatora P, aż do momentu, gdy po około 20,5 godzinach obciążenie w symulacji jest stopniowo zmieniane na 1,5 P, aż do upływu 24 godzin. Od razu widać, że nie tylko temperatura punktu gorącego DN w stanie ustalonym zależy od lepkości oleju, ale również po naruszeniu równowagi (obciążenie zwiększone do 1,5 P) NYTRO Lyra X i NYTRO BIO 300X zapewniają lepsze chłodzenie podczas przeciążenia. Oznacza to, że płyny izolacyjne o niższej lepkości mogą poprawić parametry dynamiczne i zdolność

transformatorów do pracy w warunkach przeciążenia. NYTRO BIO 300X zapewni najlepsze konwekcyjne przenoszenie ciepła spośród trzech cieczy, a tym samym prowadzi do obniżenia temperatur w transformatorze.

Na podstawie tego przykładu można zrozumieć, jak duży wpływ na rozkład temperatury w transformatorze ma lepkość płynu izolacyjnego.

Ponadto niska lepkość, jak również szybszy spadek lepkości w zakresie temperatur roboczych również sprzyjają pojawieniu się naturalnej konwekcji. Jest to szczególnie ważne w transformatorach z chłodzeniem naturalnym (bez pomp). Liczba Grashofa stanowi bezwymiarowy wskaźnik stosunku sił wyporu do lepkości danego płynu w (1) [2].

$$Gr = \frac{L^3 * \rho^2 * g * \beta * \Delta\theta}{\mu^2} \quad (1)$$

gdzie:

- L – wymiar charakterystyczny,
- ρ – gęstość,
- μ – lepkość dynamiczna,
- g – stała grawitacyjna,
- β – współczynnik rozszerzalności cieplnej,
- $\Delta\theta$ – gradient temperatury oleju.

Dla najbardziej interesującego nas zakresu temperatur (od 20°C do 100°C) obliczono liczbę Grashofa dla trzech cieczy i przedstawiono ją na rysunku 2. W tych obliczeniach L zostało ustawione na 1, a $\Delta\theta$ na 5 K nominalnie, tak jak w celach porównawczych. Większy wzrost liczby Grashofa wraz z temperaturą jest wyraźnie spowodowany mniejszą lepkością. W praktyce ciecze o wyższych liczbach Grashofa w zakresie temperatur pracy będą prowadziły do lepszego chłodzenia konwekcyjnego naturalnego w transformatorze (ze względu na większe natężenie przepływu).

Patrząc zarówno na rysunek 1 jak i rysunek 2 widać wyraźnie, że wyższe konwekcyjne przenoszenie ciepła oczekiwane przez ciecze o niższej lepkości podczas konwekcji naturalnej przekłada się na niższe temperatury w transformatorze.

W praktyce producent transformatora może zastosować ciecze o niższej lepkości, aby zoptymalizować daną konstrukcję i zaoszczędzić pieniądze na systemach chłodzenia i przewodach. Z drugiej strony, można zdecydować się na zachowanie tej samej konstrukcji i efektywnie produkować transformator o wyższej przeciążalności i niższej temperaturze pracy. Jest to szczególnie przydatne w krajach o gorącym klimacie, gdzie wiele zakładów energetycznych określa bardziej rygorystyczne wymagania dotyczące wzrostu temperatury, aby uwzględnić wyższe temperatury otoczenia.

Innym interesującym aspektem obniżenia temperatury transformatora przy obciążeniu jest wpływ na straty obciążeniowe. Regulacje Unii Europejskiej ECODESIGN są przykładem zwiększonego nacisku na przedsiębiorstwa energetyczne w celu zmniejszenia strat w transformatorach. Mimo że próby strat są zwykle wykonywane w temperaturze 75°C, dokładniejszą ocenę strat można uzyskać biorąc pod uwagę rzeczywistą temperaturę uzwojenia przy pełnym obciążeniu, która jest określana podczas próby grzania. Dlatego też obniżenie temperatury uzwojenia w porównaniu z transformatorem wzorcowym może skutkować poprawą kapitalizacji strat.

Impregnacja izolacji

Kluczową rolą cieczy izolacyjnej w układzie izolacyjnym celuloza/przespan jest impregnacja. W celu zapewnienia, że w izolacji nie ma pustych przestrzeni lub mikropęcherzyków (co może prowadzić do katastrofalnych awarii z powodu osłabienia wytrzymałości dielektrycznej), transformatory są napełniane pod próżnią, a olej jest podgrzewany. Ponadto należy zapewnić wystarczający czas odstania, aby zapewnić wystarczającą impregnację przed rozpoczęciem prób wysokonapięciowych lub uruchomieniem transformatora. Czas impregnacji zależy przede wszystkim od parametrów samego materiału stanowiącego izolację stałą, ilości izolacji stałej i lepkości cieczy. W celu skrócenia czasu impregnacji zmniejsza się lepkość oleju poprzez podgrzewanie go podczas napełniania. W pracy [3] wyraźnie wykazano, że pod względem właściwości fizykochemicznych lepkość cieczy ma największy wpływ na czas impregnacji. Zależność Lucasa-Washburna przedstawiona w (2) jest często stosowana do modelowania penetracji cieczy.

$$l^2 = \frac{r * \gamma * \cos\theta}{2\eta} * t \quad (2)$$

gdzie:

- l – długość izolacji stałej,
- r – efektywny promień kapilary,
- η – lepkość dynamiczna,
- θ – kąt zwilżania,
- t – czas impregnacji.

Jak pokazano w [3] w praktycznym przypadku olejowo-celulozowego materiału izolacyjnego wystarczy odnieść czas impregnacji do ilości izolacji i lepkości dynamicznej – jak pokazano w (3).

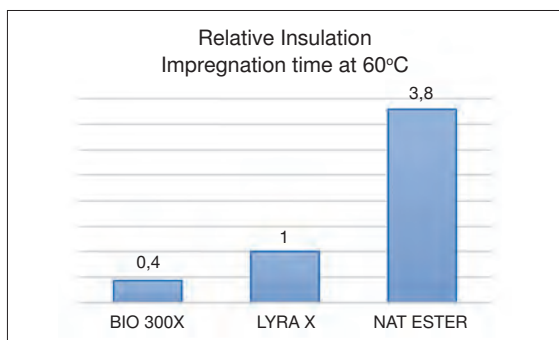
$$t \propto l^2 * \eta \quad (3)$$

Różnice w lepkości pomiędzy cieczami są więc z reguły wprost proporcjonalne do szybkości impregnacji.

Impregnacja izolacji pozostaje kluczowym czynnikiem w procesie napełniania olejem i uruchamiania transformatorów.



Rys. 3. Przykład uzwojenia z przewodem owiniętym papierem i strukturą z tektury prasowanej – impregnacja płynem izolacyjnym w miejscach zalewania materiału izolacyjnego jest konieczna dla zapewnienia braku pęcherzyków powietrza i wysokiej efektywnej wytrzymałości dielektrycznej



Rys. 4. Przykład przybliżonej względnej szybkości impregnacji izolacji przy 60°C

Stabilność utleniania

W transformatorze energetycznym ciepło, tlen i woda są głównymi czynnikami wpływającymi na starzenie się izolacji ciekłej. Stabilność utleniania jest najbardziej istotna w przypadku cieczy izolacyjnych, chociaż ciecze estrowe mają znacznie gorszą stabilność hydrolytyczną niż oleje mineralne i węglowodory [4].

Tabela 2

Niektóre wymagania dla różnych typów cieczy izolacyjnych oparte na aktualnych normach IEC, ocenione zgodnie z normą IEC 61125 w celu zilustrowania ich typowych względnych stabilności utleniania

Typ cieczy	Specyfikacja	Czas trwania procesu starzenia	Maksymalna ilość kwasów dopuszczalna po starzeniu
Mineral Uninhibited	IEC 60296	164 h	1,2 mgKOH/g
Mineral trace inhibited	IEC 60296	332 h	1,2 mgKOH/g
Mineral Inhibited "Type A" High Grade NYTRO BIO 300X	IEC 60296	500 h	0,3 mgKOH/g
Synthetic Ester ¹⁾	IEC 61099	164 h	0,3 mgKOH/g
Natural Ester ¹⁾	IEC 62770	48 h	0,6 mgKOH/g

¹⁾ Większość dostępnych w handlu estrów naturalnych i syntetycznych należy traktować jako ciecze inhibitowane ze względu na obecność dodatków antyoksydacyjnych.

Według obecnych norm, jak pokazano w tabeli 2, typowo relatywnie gorsza stabilność oksydacyjna naturalnych i syntetycznych estrów jest potwierdzona przez mniej rygorystyczne wymagania. Biopochodna ciecz węglowodorowa NYTRO BIO 300X jest olejem z inhibitorami spełniającym wymagania normy IEC 60296. Spełnia ona, a nawet przewyższa wymagania dotyczące specjalnych zastosowań w zakresie stabilności utleniania i jest w pełni odpowiednia dla transformatorów z układem swobodnego oddychania. Ponadto, NYTRO BIO 300X wykorzystuje powszechnie stosowany fenolowy przeciwutleniacz Butylated Hydroxytoluene (BHT), który jest powszechnie stosowany w inhibitowanych mineralnych olejach izolacyjnych. Zaletą tego jest to, że metody badań laboratoryjnych według IEC 60666 pozwalają na monitorowanie inhibitorów w NYTRO BIO 300X.

Biodegradowalność i trwałość

Czasami nie można uniknąć zastosowania transformatora mocy w obszarze wrażliwym środowiskowo – na przykład na morskiej farmie wiatrowej lub w pobliżu obszaru chronionego. Z tego powodu – zgodnie z lokalnymi przepisami – klasyfikacja cieczy jako łatwo ulegającej biodegradacji z wykorzystaniem certyfikatu OECD 301 może pomóc w uzyskaniu wymaganych pozwoleń na użytkowanie urządzeń w tym obszarze. NYTRO BIO 300X jest klasyfikowany jako „łatwo ulegający biodegradacji” zgodnie z OECD 301F. Powszechnie stosowane oleje naftenowe, takie jak NYTRO Lyra X, są uznawane za biodegradowalne z natury – będą ulegać degradacji w wolniejszym tempie i wymagają przystosowania środowiska do szybkiej biodegradacji. Co więcej, NYTRO BIO 300X składa się w >98% z węglowodorów pochodzenia biologicznego w testach przeprowadzonych zgodnie z normą ASTM D6866 i dlatego jest zgodny z normą USDA «Bio-Preferred». Norma ASTM D6866 wykorzystuje spektroskopię masową ze stosunkiem izotopów do określania wieku węgla w substancji, co umożliwia weryfikację czy substancja pochodzi z węgla kopalnego, czy nie.

Wnioski

Lepkość oleju izolacyjnego odgrywa ważną rolę w zdolności chłodzenia cieczy. Ogólnie rzecz biorąc olej o niskiej lepkości prowadzi do lepszego chłodzenia transformatora energetycznego. Konwekcja – szczególnie naturalna, która jest ważna w transformatorach z chłodzeniem olejowo-naturalnym (ON) – prawie całkowicie zależy od lepkości cieczy. Ostatecznie transformator może zostać przeciążony – bez znaczącego wzrostu temperatury punktu gorącego. Istnieje również możliwość optymalizacji konstrukcji dzięki lepszej wymianie ciepła oferowanej przez ciecz. Lepkość ma również wpływ na impregnację papieru izolacyjnego – oleje o niższej lepkości wymagają krótszego czasu impregnacji, co jest ważnym aspektem praktycznym związanym z ryzykiem powstawania pęcherzyków powietrza w izolacji. Ponadto olej biodegradowalny może być czasem wymagany do stosowania w środowiskach wrażliwych lub tam, gdzie wymagają tego lokalne przepisy.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Susa D., *Dynamic thermal modelling of power transformers*, Doctorate, Helsinki University of Technology, Espoo, 2005.
- [2] Bejan A., *Convection heat transfer*. John Wiley & Sons, 2013.
- [3] Wiklund P., Wedin P., *Functional properties of insulating liquids with focus on cellulose wetting*, CIGRE A2 & D1 2011, 2011.
- [4] Schneider M.P., *Plant-oil-based lubricants and hydraulic fluids*, „Journal of the Science of Food and Agriculture” 2006, vol. 86, no. 12, pp. 1769-1780.

