

## **Biodegradowalne oleje transformatorowe**

**Streszczenie:** *Oleje biodegradowalne mają realne perspektywy szerokiego zastosowania w energetycznych transformatorach mocy. Warunkiem niezbędnym dla tego zastosowania jest kompleksowe poznanie właściwości tych nowych olejów transformatorowych. Badania w tym kierunku, są coraz intensywniej realizowane w wielu ośrodkach badawczych na świecie. Uzyskane już wyniki wykazują na bardzo dobre właściwości transformatorowych estrów organicznych, w porównaniu do olejów mineralnych. Cechą szczególną tego typu olejów jest dobra rozpuszczalność wody, która rzutuje na ich zachowanie eksploatacyjne.*

**Słowa kluczowe:** olej transformatorowy, ester naturalny

### **Wstęp**

Mineralne oleje izolacyjne, produkowane z ropy naftowej, są powszechnie stosowane w transformatorach energetycznych na świecie od początku rozwoju elektroenergetyki. Decydują o tym: zarówno bardzo dobra ich współpraca z materiałami izolacyjnymi stałymi – papierami i preszpanami - jak i opanowana od dawna technologia produkcji i technika diagnostyki [1-3]. Zaufanie producentów i użytkowników transformatorów do izolacji papier – olej mineralny wynika z bardzo dobrego poznania badawczego właściwości tej izolacji oraz bardzo dużych światowych doświadczeń technologicznych i eksploatacyjnych. Mineralne oleje transformatorowe charakteryzują się jednak bardzo niekorzystnymi właściwościami, takimi jak łatwopalność, toksyczność i słaba biodegradowalność.

Z tych względów od dawna poszukiwane są nowe transformatorowe cieczki izolacyjne. Po zakazie stosowania na świecie olejów syntetycznych PCB, alternatywnymi cieczkami dla oleju mineralnego stały się oleje silikonowe i estry syntetyczne. Są one trudnopalne, a estry syntetyczne są jednocześnie dobrze biodegradowalne. Ich zastosowanie, ze względu na wysoką cenę, jest jednak ograniczone. Wady tej nie mają oleje transformatorowe bazujące na olejach roślinnych. Koncepcja wykorzystania olejów roślinnych w transformatorach energetycznych wywołała silne zainteresowanie specjalistów w tej dziedzinie [4-5]. To zainteresowanie przełożyło się na handlową dostępność transformatorowych estrów organicznych [6,7]. Oleje te są nietoksyczne i dobrze biodegradowalne, a zatem przyjazne środowiskowo. W porównaniu do innych olejów transformatorowych odznaczają się najwyższymi temperaturami zapłonu i palenia. Estry organiczne zostały już zastosowane w licznych transformatorach rozdzielczych na świecie i w nielicznych transformatorach dużej mocy [8,9]. W Polsce natomiast roślinne oleje transformatorowe nie są jeszcze szeroko stosowane, a dotycząca ich problematyka badawcza jest nadal otwarta.

### **Wilgoć w olejach biodegradowalnych**

Woda rozpuszczona w oleju transformatorowym zmienia jego właściwości dielektryczne [10] i stanowi jeden z ważniejszych informacji o stanie technicznym transformatora [11]. Rozpuszczalność wody w transformatorowych estrach naturalnych jest - w temperaturze pokojowej - około 25 – krotnie wyższa niż w olejach mineralnych. W temperaturze 100 st. C ta różnica jest już około 4-krotna, a rozpuszczalność wody w estrze organicznym może wynosić 3000 ppm [12]. Właściwość ta może odgrywać

pozytywną rolę ze względu na zmniejszenie zawartości wody w izolacji papierowej. Jednocześnie należy mieć na uwadze, że jednym z głównych źródeł wody w olejach transformatorowych jest rozkład polimerów izolacji celulozowej. Tu również uwidacznia się przewaga estrów organicznych, w których otoczeniu stopień depolimeryzacji papieru transformatorowego jest niższy niż w przypadku oleju mineralnego [12]. Jak pokazuje praca [13], w miarę starzenia oleju biodegradowalnego, wzrasta co prawda absolutna zawartość wody w większym stopniu niż w oleju mineralnym, ale nadal charakteryzuje się on wyższą wartością napięcia przebicia. Istotne wyniki badań wpływu starzenia na wytrzymałość olejów transformatorowych przy niskiej wilgotności przedstawione zostały w pracy [14], z której wynika tendencja olejów na bazie estrów do wzrostu wytrzymałości elektrycznej wraz ze starzeniem się.

### **Elektryzacja olejów biodegradowalnych**

Problem elektryzacji statycznej w olejach mineralnych pojawia się w literaturze od dawna ze względu na zagrożenie przebiciem izolacji transformatorowej. Podatność oleju transformatorowego na elektryzację statyczną badana jest najczęściej w układach przepływowych i w układach wirujących. W badaniach wykonywanych w układzie z wirującą tarczą, w przypadku olejów mineralnych, zauważana jest zależność prądu elektryzacji od średnicy tarczy, jej prędkości obrotowej i materiału z jakiego tarcza jest wykonana [15,16]. Istotne jest znaczące zwiększenie wartości prądu elektryzacji w przypadku oleju zestarzonego [17].

Podobne zależności prądu elektryzacji od średnicy tarczy, jej prędkości obrotowej i materiału tarczy, obserwuje się w przypadku olejów biodegradowalnych. Rejestrowane wartości prądów elektryzacji są jednak większe dla estrów niż dla olejów mineralnych [18].

### **Mieszalność olejów biodegradowalnych z olejami mineralnymi**

Naturalne oleje, mają dobre własności elektryczne, nieustępujące klasycznym olejom transformatorowym. Ciekawym zagadnieniem jest próba mieszania tych dwóch rodzajów olejów transformatorowych. Badania przedstawione w [19,20] pokazują, że

- z powodu wysokiego poziomu nasycenia estru organicznego można przyjąć, że ilość wody w mieszaninie może być wysoka, ale względna zawartość wilgoci może nadal być bardzo niska;
- mieszanina charakteryzuje się wyższym napięciem przebicia w porównaniu do czystego oleju mineralnego, również ze względu na efekt nasycenia. Z tego samego powodu, napięcie przebicia mieszanin jest mniej zależne od temperatury niż w czystym oleju mineralnym;
- wszystkie badane mieszaniny, starzone i niestarzone, mają wyższe napięcie przebicia niż świeży olej mineralny;
- mieszaniny charakteryzują się mniejszą tendencją do elektryzacji statycznej;
- mieszaniny nie pogarszają właściwości przewodzenia ciepła.

### **Wyładowania niepełne w olejach biodegradowalnych**

Oleje transformatorowe w obecności wyładowań niepełnych zmieniają swoje właściwości z powodu degradacji chemicznej i fizycznej. Wyładowania niepełne w izolacji ciekłej mogą rozwijać się w fazie gazowej, powstałej w wyniku iniekcji ładunku w miejscach lokalnej intensyfikacji pola elektrycznego lub powstałej w wyniku zjawiska „bubble effect”. [21-23].

Jak dotąd, w literaturze światowej przedstawiono charakterystyki wyładowań niepełnych różnych naturalnych olejów: oleju na bazie estru palmowego [24], oliwy z oliwek i oleju rycynowego [25]. Badania wyładowań niepełnych w estrach organicznych wskazują na niższą aktywność wyładowań niepełnych w suchych estrach w porównaniu do oleju mineralnego [26,27]. W porównaniu do oleju mineralnego,

## **IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016**

niestarzone estry organiczne charakteryzują się niższą aktywnością wylądowań niezupełnych i stromym wzrostem impulsów wylądowań niezupełnych z czasem starzenia [28]. Notuje się także bardzo silną zależność wartości napięcia początkowego wylądowań niezupełnych od metodyki pomiaru, dla estrów o różnym stopniu zawilgocenia [29].

### **Podsumowanie**

Mineralne oleje transformatorowe są powszechnie stosowane w transformatorach energetycznych na świecie od początku rozwoju elektroenergetyki. Wynika stąd bardzo dobre poznanie badawcze właściwości tej izolacji, jak również zaufanie producentów i użytkowników transformatorów. Jednakże względy ekologiczne wymusiły prace nad nowymi rodzajami olejów transformatorowych, czego efektem są dostępne już handlowo transformatorowe estry organiczne. Podstawowe właściwości elektroizolacyjne świeżych i dobrze wysuszonych olejów tego typu, wyznaczone zgodnie z obowiązującymi normami, są dobre lub bardzo dobre. Brakuje jednak wyraźnie, w porównaniu z olejami mineralnymi, kompleksowych badań laboratoryjnych zmierzających do pełnego poznania mechanizmów występujących w eksploatacji procesów. Stąd też wynika ważność i aktualność problematyki badawczej dotyczącej estrów organicznych, jako izolacji ciekłej transformatorów elektroenergetycznych.

### **Literatura**

1. Jaroszewski Maciej, Pietruszewicz Mariusz, *Long-term study of changes of physico-chemical parameters of transformer oil*; Proceeding of the International CIGRE Colloquium Transformer Research and Asset Management; Dubrovnik, Croatia, May 16-18 2012
2. H Morañda, M Sztolcman, K Walczak, H Mościcka-Grzesiak, *Enlargement of fingerprint in procedure of defects recognition in oil-paper insulation using time parameters of PD*, Proc. 14th Int. Symp. High Voltage Engineering, ISH 2005, Vol.5
3. C. T. Dervos, C. D. Paraskevas, P., Skafidas, P. Vassiliou, *Dielectric Characterization of Power Transformer Oils as a Diagnostic Life Prediction Method*, IEEE Electrical Insulation Magazine, January/February 2005 — Vol. 21, No. 1
4. K. Longva: *Natural ester distribution transformers; improved reliability and environmental safety*, Nordic Insulation Symposium, Trondheim, Norway, 2005, pp. 293 – 295
5. CIGRE Working Group A2.35 Report; *Experiences in Service with New Insulating Liquids*, October 2010
6. ABB, *Biotemp*, Descriptive Bulletin 47 - 1050, Revised 01 / 02
7. Cooper Power Systems, *Envirotemp FR 3 Fluid* - Bulletin B 900 - 00092 Product Information, 06. 2005
8. G. J. Pukel, R. Eberhardt, H. M. Muhr, F. Bauman, W. Lick; *Large power transformers for alternative insulating fluids*, 16 th International Symposium on High Voltage Engineering, Johannesburg, 2009, Paper F-27
9. J. C. Mendes et al; *Advanced application of natural ester vegetable oil in a HV power transformers*, CIGRE 2008, Paris, ref. A2 – 101
10. Jaroszewski Maciej, Pospieszna Janina; *Changing the dielectric properties of insulating oil under the influence of water content*, 6th International Conference on Broadband Dielectric, Madrid, Spain, 07-10 September 2010
11. Jarosław Gielniak, Andrzej Graczkowski, Hubert Morañda, Piotr Przybyłek, Krzysztof Walczak, Bolesław Bródka, Jarosław Szymański, Hanna Mościcka-Grzesiak, *Zawilgocenie izolacji transformatorów pracujących w polskim systemie elektroenergetycznym*, PAK, Vol. 54, nr 11.2008

12. Yuliasuti E., "Analysis of dielectric properties comparison between mineral oil and syn-thetic ester oil" Master thesis, 2010 r.
13. Sun-Ho Choi, Chang-Su Huh, *Analysis of the Chemical and Electrical Characteristic of Vegetable Insulating Oils Exposed to Accelerated Aging*, International Conference on Innovations in Electrical and Civil Engineering (ICIECE), Pattaya, Tajlandia, 2013, 38-43
14. Tenbohlen S., Koch M., Vukowic D., Weinlader A., Baum J., Harthun J., Schliker M., Barker S., Frotscher R., Dohnal D., Dyer P., *Application of vegetable oil-based insulating fluids to hermetically sealed power transformers*, CIGRE, 2008, paper A2-102, 1-8
15. Józef Kędzia, Stefan Wolny, Maciej Zdanowski, Dariusz Zmarzły, *Zagrożenia wynikające z elektryzacji strumieniowej w transformatorach energetycznych*, Seminarium Postępy w Technice Wysokich Napięć 100. Rocznica Urodzin Profesora Stanisława Szpora 16 maj 2008, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej
16. Maciej Zdanowski, Stefan Wolny, Dariusz Oktawian Zmarzły, Tomasz Boczar, *ECT of ethanol and hexane mixtures in the spinning disk system*, Journal of Electrostatics 65 (2007) 239–243
17. Bouslimi Y., Fofana I., Hemmatjou H., Volat C., *Static electrification assessment of transformer oils in the spinning disc system*, High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2010 International Conference on, IEEE 2010, s. 337 – 340
18. M. Talhi, I. Fofana and S. Flazi, *The Electrostatic Charging Tendency of some Environmentally Friendly Insulating Fluids*, 2013 Electrical Insulation Conference, Ottawa, Ontario, Canada, 2 to 5 June 2013
19. C. Perrier, A. Beroual, J-L. Bessede, *Improvement of Power Transformers by using Mixtures of Mineral Oil with Synthetic Esters*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 13, No. 3; June 2006
20. H. Borsi, E. Gockenbach, *Properties of Ester Liquid Midel 7131 as an Alternative Liquid to Mineral Oil for Transformers*, IEEE International Conference on Dielectric Liquids, ICDL 2005.
21. J. S. N'cho, T. Aka-Ngnui, A. Beroual, I. Fofana, *Effect of Electrical Discharge on Oil Decaying Process*, International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2010,
22. M. Pompili, *Partial Discharge Development and Detection in Dielectric Liquids*; IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 16, No. 6; December 2009
23. P. Przybyłek, Z. Nadolny, H. Moscicka-Grzesiak, *Bubble effect as a consequence of dielectric losses in cellulose insulation*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Volume:17 ,Issue 3, pp. 913 – 919, 2010
24. A. Susilo, J. Muslim, Yanuar Z. Arief, Nor Asiah Muhamad Masayuki Hikita, Masahiro Kozako, Motoo Tsuchie, Takashi Suzuki, Satoshi Hatada, Akinori Kanetani, Takaaki Kano, Suwarno, Umar Khayam, *Comparative Study of Partial Discharge Characteristics and Dissolved Gas Analysis on Palm-Based Oil as Insulating Material*, The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy, ICPERE 2014
25. S.Banumathi, S.Chandrasekar, Gian Carlo Montanari, *Investigations on PD Characteristics of Vegetable Oils for High Voltage Applications*, IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, 2013
26. J. Fabian, B. Wieser, M. Muhr, R. Schwarz, G. J. Pukel, M. Stossl, *Partial discharge behavior of environmentally friendly and hardly inflammable ester liquids compared to mineral oil for power transformers*; 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 23-27 September 2012, Bali, Indonesia

### **IX Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2016**

27. I. Kolcunová, M. Marci, J. Kurimsky, *Skúmanie výbojovej činnosti v rastlinných olejoch*, Starnutie elektroiz. systémov, No.8, 2010
28. S. Chandrasekar, G. C. Montanari, *Analysis of Partial Discharge Characteristics of Natural Esters as Dielectric Fluid for Electric Power Apparatus Applications*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 21, No. 3; pp. 1251-1259 June 2014
29. Rakowiecki Kacper, Jaroszewski Maciej: *Pomiary napięcia początkowego wyładowań niezupełnych w biodegradowalnym oleju transformatorowym* Raporty Inst. Podst. Elektrotech. Elektrotechnol. PWroc. Ser. SPR nr 7/2014

---

**Autor:** dr inż. Maciej Jaroszewski; Wydział Elektryczny Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, e-mail: [maciej.jaroszewski@pwr.edu.pl](mailto:maciej.jaroszewski@pwr.edu.pl)