

Zmiany starzeniowe mineralnego oleju izolacyjnego domieszkowanego fulerenami C₆₀

Paweł Aksamit, Dariusz Zmarzły

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej

W pracy przedstawiono analizę wpływu procesu starzenia na właściwości elektrostatyczne mineralnego oleju transformatorowego, modyfikowanego fulerenami C₆₀. Badania przeprowadzone zostały na trzech seriach próbek: jednej świeżej oraz dwóch poddanych procesowi przyspieszonego utleniania odpowiednio przez 24 h oraz 96 h. Każda seria składała się z 7 próbek o różnym stężeniu fulerenów C₆₀. Próbki poddane zostały pomiarom prądu elektryzacji w układzie z wirującym elektrometrem.

Słowa kluczowe: mineralny olej transformatorowy, nanotechnologia, fulereny, C₆₀

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat udokumentowano dziesiątki awarii transformatorów związanych z elektrycznością statyczną [1–7]. Wyczerpujący przegląd tego typu przypadków zawarto w pracy [9].

Elektryzacja strumieniowa w transformatorach mocy związana jest z przepływem cieczy izolacyjnej. Podczas pracy transformatora generowana jest duża ilość ciepła, które musi być w sposób ciągły odprowadzane na zewnątrz układu. W większości transformatorów będących obecnie w użyciu, do chłodzenia uzwojeń transformatora wykorzystywany jest mineralny olej elektroizolacyjny.

Na granicy cieczy oraz ciała stałego tworzy się podwójna warstwa ładunku. Podczas przepływu cieczy, część jonów akumulowana jest przy granicy faz, a część unoszona wraz z cieczą, co prowadzi do zjawiska elektryzacji strumieniowej. Zjawisko to może prowadzić do lokalnego nagromadzenia ładunku oraz powstania potencjału, który może wywołać szkodliwe wyładowania na powierzchni ciała stałego.

Ponieważ każda awaria transformatora mocy pociąga za sobą znaczne straty oraz zagrożenie dla integralności całego systemu energetycznego, prace nad zjawiskiem elektryzacji strumieniowej prowadzi wiele ośrodków badawczych na całym świecie [5, 8–16].

Rosnące zapotrzebowanie na energię elektryczną na świecie wymusza wzrost mocy oraz napięć pracy transformatorów energetycznych. Rozpraszanie ciepła wytworzonego w takich jednostkach wymaga zastosowania wymuszonego przepływu cieczy. Aby ograniczyć ryzyko związane z elektryzacją strumieniową, w większości układów utrzymuje się przepływ laminarny, nie przekraczający prędkości 1 m/s. Niewielka prędkość przepływu wymaga jednak większych gabarytów układu, aby zapewnić wystarczające warunki chłodzenia.

Ograniczenie tendencji do elektryzacji oleju elektroizolacyjnego pozwoliłoby na zwiększenie przepływu, a co za tym idzie polepszenie warunków chłodzenia oraz ograniczenie wymiarów jednostek transformatorowych, bez narażania ich na awarie związane z elektrycznością statyczną.

Do dnia dzisiejszego, najszerzej przebadanym dodatkiem do olejów izolacyjnych stosowanym w celu redukcji zjawiska elektryzacji oraz jako pasywator miedzi, jest 1,2,3-benzotriazol (BTA). Przez pewien czas BTA stosowany był jako inhibitor zjawiska elektryzacji w Japonii oraz Australii, został jednak wycofany z użytku ze względu

na niejednoznaczne wyniki dotyczące jego wpływu na wytrzymałość elektryczną oleju [17–20].

W ramach poprzednich prac badawczych zaproponowano zastosowanie alternatywnego inhibitora elektryzacji w postaci fulerenów C₆₀. Uzyskane na świeżym mineralnym oleju elektroizolacyjnym wyniki wskazały, że poprzez domieszkowanie oleju fulerenami C₆₀ możliwe jest ograniczenie tendencji do elektryzacji oleju o rząd wielkości, nie pogarszając przy tym innych, istotnych właściwości oleju, jak wytrzymałość elektryczna czy rezystywność [21].

Z punktu widzenia potencjalnego praktycznego zastosowania uzyskanych, w ramach wspomnianych badań, wyników, istotne są między innymi właściwości inhibitowanego C₆₀ oleju w procesie starzenia, które jest nieuchronnym wynikiem wysokiej temperatury pracy transformatora. Przeprowadzone badania dotyczące wpływu procesu starzenia na skłonność do elektryzacji mineralnego oleju elektroizolacyjnego przedstawiono w niniejszej pracy.

Przygotowanie próbek

Do badań wykorzystano mineralny, nieinhibitowany olej elektroizolacyjny TRAF0 produkcji Orlen Oil oraz fulereny C₆₀ o czystości 99,5 %, pochodzące od producenta, firmy Term USA.

Przygotowano trzy zestawy próbek oleju. Każdy zestaw składał się z 7 próbek o różnej zawartości fulerenów C₆₀ od 0 mg/l do 300 mg/l. Domieszkowanie polegało na naturalnym rozpuszczeniu fulerenów w oleju. Czas rozpuszczania największej domieszki, wielkości 300 mg/l, wynosił ok. 2 tygodnie.

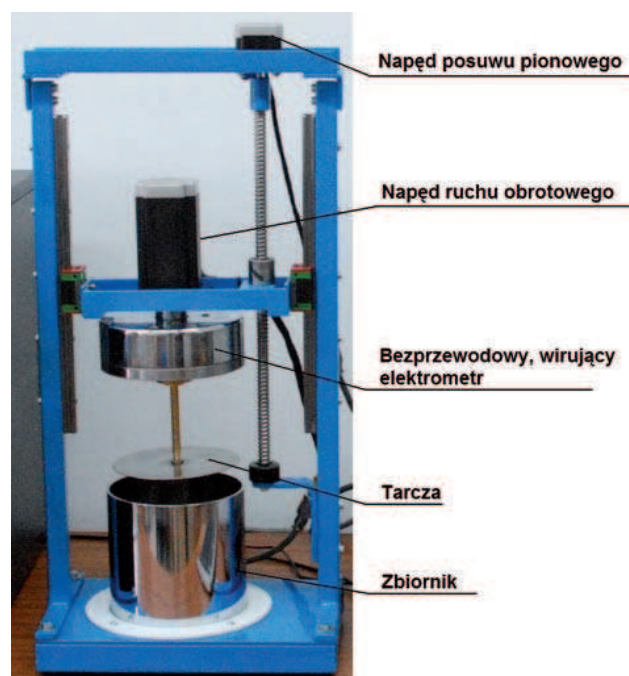
W kolejnym kroku, dwa zestawy próbek poddane zostały przyspieszonemu starzeniu w temperaturze 110 °C, w obecności tlenu oraz miedzi, przez odpowiednio 24 h oraz 96 h. Następnie wszystkie próbki wygrzewane były przez 2 h w temperaturze 75 °C, w celu częściowego osuszenia.

Układ pomiarowy

Wszystkie próbki poddane zostały pomiarom tendencji do elektryzacji w układzie z wirującym elektrometrem (rys. 1).

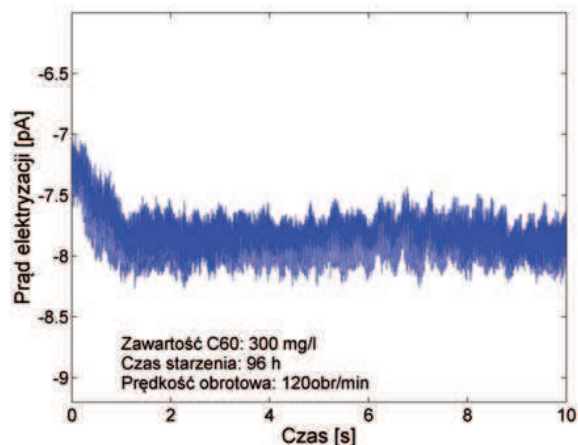
Prąd elektryzacji, płynący przez ciecz między zbiornikiem a dyskiem, mierzony jest za pomocą elektrometru zamontowanego nad dyskiem na osi napędowej. Stalowy, nieruchomy zbiornik o średnicy 130 mm i wysokości 135 mm (objętość 1,6 l) jest zamknięty pokrywą, która zawiera układ pomiarowy. Pokrywa wyposażona jest w izolowane łożysko, dzięki któremu wirujący elektrometr może obracać się wraz z dyskiem. W dolnej części pokrywy znajduje się uchwyt, w którym montowana jest oś z dyskiem. Górna część pokrywy wyposażona jest w złącze, służące do połączenia pokrywy z silnikiem. Do napędu zastosowano silnik krokowy 57BYGH (4,2 A, 180 Ncm), zasilany sterownikiem SMC139, pracującym w trybie pracy mikrokrokowej. Sterownik kontrolowany jest przez komputer za pośrednictwem bezprzewodowego łącza Bluetooth.

Wewnątrz badanej cieczy zanurzona jest metalowa tarcza o średnicy 12 cm. Głębokość zanurzenia kontrolowana jest przez komputer sterujący.



Rys. 1. Układ z wirującą tarczą i wirującym elektrometrem

Fig. 1. Setup with rotating disc and rotating electrometer



Rys. 2. Przebieg czasowy prądu elektryzacji

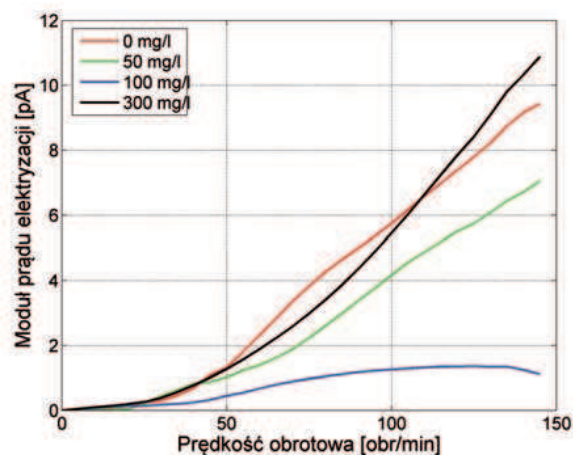
Fig. 2. Time run of electrification current signal

Elektryzację mierzono przy prędkościach obrotowych w zakresie od 0 obr/min do 145 obr/min z krokiem co 5 obr/min. Przy każdej prędkości obrotowej rejestrowane było 10 sekund sygnału prądu elektryzacji, z częstotliwością próbkowania 500 Hz. Przykładowy przebieg czasowy rejestrowanego sygnału przedstawiono na rys. 2.

W ciągu pierwszych sekund, w sygnale występują wyraźne stany przejściowe, związane z nagłą zmianą prędkości obrotowej tarczy. W związku z tym wartość średnia, będąca miarą prądu elektryzacji przy stałej prędkości obrotowej, liczona była z pominięciem pierwszych 2 s sygnału.

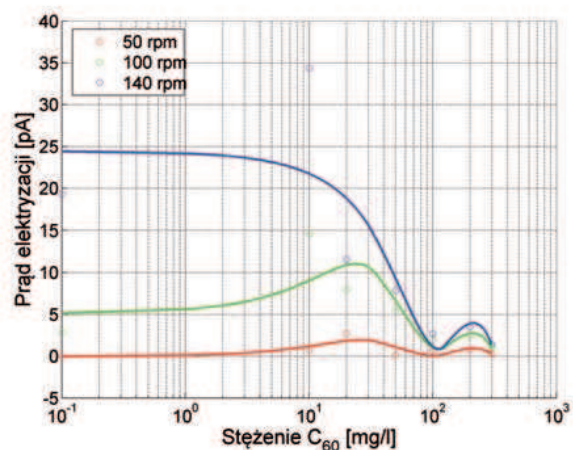
Wyniki

Zależność prądu elektryzacji od prędkości obrotowej dla wybranych próbek oleju starzonego przez 96 h przedstawia rys. 3. Przy każdym stężeniu prąd rośnie wraz ze wzrostem prędkości przepływu cieczy. Jednak bezwzględne wartości prądu różnią się znacznie pomiędzy próbkami o różnej zawartości fulerenów C_{60} . Domieszka C_{60} w ilościach 50 mg/l i 100 mg/l spowodowała



Rys. 3. Wpływ zawartości C_{60} na wartość prądu elektryzacji w badanym zakresie prędkości przepływu; olej starzony przez 96 h

Fig. 3. Influence of C_{60} content on electrification current value in whole range of liquid flow velocities analyzed; oil aged for 96 h



Rys. 4. Wpływ zawartości C_{60} na prąd elektryzacji mineralnego oleju transformatorowego przy różnych prędkościach obrotowych; olej świeży

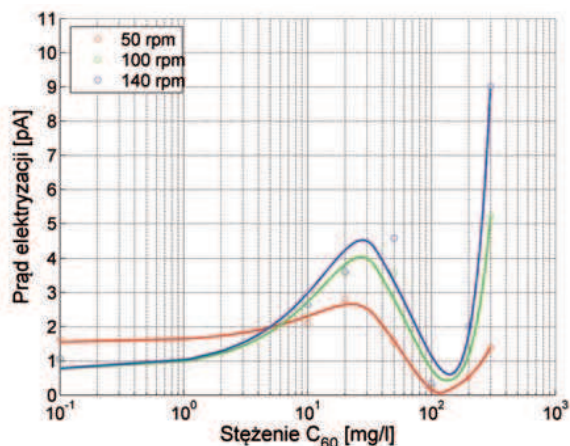
Fig. 4. Influence of C_{60} content on electrification current in mineral transformer oil for different flow velocities; fresh oil

wała istotną redukcję prądu elektryzacji w całym zakresie badanych prędkości obrotowych. Przy stężeniu 100 mg/l, prąd elektryzacji został zredukowany o 90 % w stosunku do nieinhibowanego oleju. Dalsze zwiększanie stężenia do 300 mg/l spowodowało ponowny wzrost prądu elektryzacji, do wartości podobnych jak w czystym oleju.

Wpływ stężenia C_{60} na wartość bezwzględną prądu elektryzacji we wszystkich badanych zestawach próbek przedstawiono na rys. 4–6.

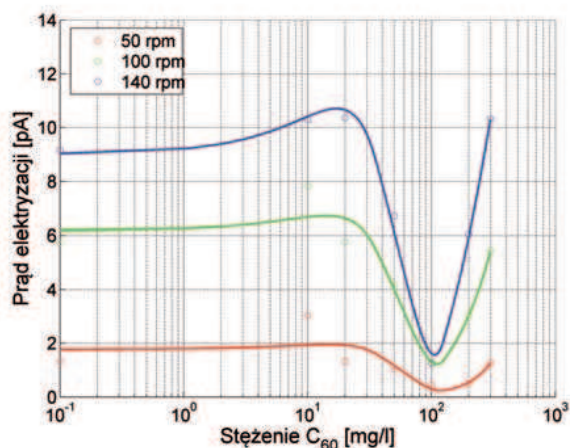
Niezależnie od prędkości obrotowej oraz stopnia zesterzenia oleju, wpływ jest powtarzalny. We wszystkich przypadkach stężenia rzędu 10 mg/l do 20 mg/l przynoszą wzrost prądu elektryzacji w stosunku do oleju niedomieszkowanego. Wartości prądu zmniejszają się ponownie przy stężeniu 50 mg/l. Minimalne wartości prądu odnotowano w próbkach o zawartości C_{60} wynoszącej 100 mg/l. Zwiększanie stężenia powyżej tej wartości, do 200 mg/l, nie przynosi korzyści, powodując ponowny wzrost prądu elektryzacji.

W zależności od czasu starzenia uzyskano inny wpływ domieszki C_{60} wielkości 300 mg/l. W przypadku świeżego oleju, domieszka tej wielkości przyniosła znaczną redukcję prądu



Rys. 5. Wpływ zawartości C_{60} na prąd elektryzacji mineralnego oleju transformatorowego przy różnych prędkościach obrotowych; olej starzony przez 24 h

Fig. 5. Influence of C_{60} content on electrification current in mineral transformer oil for different flow velocities; oil aged for 24 h



Rys. 6. Wpływ zawartości C_{60} na prąd elektryzacji mineralnego oleju transformatorowego przy różnych prędkościach obrotowych; olej starzony przez 96 h

Fig. 6. Influence of C_{60} content on electrification current in mineral transformer oil for different flow velocities; oil aged for 96 h

do elektryzacji, porównywalną z odnotowaną w próbce o stężeniu 100 mg/l. W próbkach poddanych przyspieszonemu starzeniu, dodatek C_{60} wielkości 300 mg/l powoduje istotny wzrost prądu elektryzacji. W przypadku próbki starzonej przez 24 h, odnotowano prawie 10-krotny wzrost w porównaniu z niedomieszkowaną próbka.

Dostępne badania wskazują na wysoką reaktywność cząsteczki C_{60} , między innymi na jej zdolność do wiązania wolnych rodników [22]. Obserwowany wpływ może być więc związany ze zmianą gęstości objętościowej ładunku lub ograniczeniem tempa wymiany ładunku na granicy fazy stałej i ciekłej.

Niestety, ze względu na ogromną złożoność mineralnego oleju, trudno określić naturę tego wpływu w sposób jednoznaczny. Zadanie utrudnia dodatkowo znaczna ilość nieokreślonych zanieczyszczeń, które występują w oleju, i które trudno jest kontrolować.

Wnioski

Wyniki wskazują, że domieszka C_{60} w ilości 100 mg/l powoduje istotne ograniczenie prądu elektryzacji. Pokrywa się to z wynikami uzyskanymi w trakcie poprzednich badań autorów, które były prowadzone wyłącznie na świeżych olejach [21].

Z praktycznego punktu widzenia duże znaczenie ma zdolność C_{60} do redukcji tendencji do elektryzacji mineralnego oleju transformatorowego poddanemu procesowi starzenia. Fakt, że optymalne stężenie domieszki, redukujące prąd elektryzacji w największym stopniu, jest niezależne od stopnia zesterzenia oleju, daje szansę na praktyczne zastosowanie proponowanej przez autorów metody.

Wymaga to jednak znacznego uzupełnienia zakresu badań, szczególnie o wpływ inhibitora na wytrzymałość elektryczną oleju w procesie starzenia. Przebadane powinny zostać również różne oleje, o różnym źródle pochodzenia. Określony został również wpływ na inhibowany olej typowo pojawiających się w procesie starzenia zanieczyszczeń, takich jak woda, celuloza z izolacji papierowej transformatora i miedź.

Z poznawczego punktu widzenia, w celu wyjaśnienia natury obserwowanego wpływu, korzystne byłoby również przeprowadzenie jak najszerszych badań na czystych węglowodorach, należących do grup występujących w mineralnym oleju elektroizolacyjnym.

Bibliografia

1. Allan D., Diesendorf J. Jones S., Rungis J.: *Insulation Failures and Dielectric Diagnostics; Practices and Challenges in the Australian Region*. In CIGRE, 15/21/33-04, 1996.
2. Crofts D.: *The static electrification phenomena in power transformers. Annual Report*. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Claymont, Delaware, 1986, p. 222–236.
3. Crofts D.: *The Static Electrification Phenomena in Power Transformer*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation vol. 23, 1988, p. 137–146.
4. Gasworth S., Melcher J., Zahn M.: *Flow-Induced Charge Accumulation in Thin Insulating Tubes*. IEEE Transactions on Electrical Insulation vol. 23, 1988, p. 103–115.

5. Jeda M., Goto K., Okubo H., Miyamoto T., Tsukioka H., Kohno Y.: *Suppression of Static Electrification of Insulating Oil For Large Power Transformers*. IEEE Transactions on Electrical Insulation vol. 23, 1988, p. 153–157.
6. Morin A., Zahn M., Melcher J.: *Fluid Electrification Measurements in Transformer Pressboard-Oil Insulation*. In Sixth International Symposium on HV Engineering, Paper 13.13.1989.
7. Wu H., Jayaram S.: *DC Field Effects on Streaming Electrification in Insulating Oils*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation vol. 3, 1996, p. 499–506.
8. Aksamit P.: *Elektryzacja toluenu domieszkowanego fulerenami*. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej – Elektryka vol. 326, 2008, s. 7–8.
9. Kędzia J.: *Badania elektryzacji statycznej mineralnych olejów izolacyjnych*. Wydawnictwo WSI w Opolu, 1988.
10. Lindgren S.: *Progress in the control of static electrification in power transformers*. Electra vol. 133, 1992, p. 51–59.
11. Radwan R., El-Dewieny R., Metwally I.: *Investigation of Static Electrification Due to Transformer Oil Flow in Electric Power Apparatus*. IEEE Transactions on Electrical Insulation vol. 27, 1992, p. 278–286.
12. Wang J., Haolong M.: *Computation of streaming current in oil pipes*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation vol. 16, 2009, p. 299–304.
13. Washabaugh A., Zahn M.: *A chemical reaction-based boundary condition for flow electrification*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation vol. 4, 1997, p. 688–709.
14. Zmarzły D.: *Analiza szumów generowanych elektrycznością statyczną podczas przepływu oleju izolacyjnego*. Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, 2002.
15. Zmarzły D.: *Streaming electrification current density distribution inside pipes assuming overcharged boundary layer*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation vol. 16, 2009, pp. 372–376.
16. Zmarzły D., Aksamit P.: *Badanie elektryzacji węglowodórów domieszkowanych fullerenami*. Przegląd Elektrotechniczny, 2008, p. 44–46.
17. Moreau E., Paillat T., Touchard G.: *Flow Electrification in High Power Transformers: BTA Effect on Pressboard Degraded by Electrical Discharges*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation vol. 10, 2003, p. 15–21.
18. Morin A., Zahn M., Melcher J., Otten D.: *An absolute charge sensor for fluid electrification measurements*. IEEE Transactions on Electrical Insulation vol. 26, 1991, p. 181–199.
19. Washabaugh A., Zahn M.: *Flow electrification measurements of transformer insulation using a Couette flow facility*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation vol. 3, 1996, p. 161–181.
20. Wiklund P., Levin M., Pahlavanpour B.: *Copper Dissolution and Metal Passivators in Insulating Oil*. IEEE Electrical Insulation Magazine vol. 23, 2007, p. 6–14.
21. Aksamit P.: *Analysis of the influence of C₆₀ fullerenes on flow electrification of mineral transformer oil*. Ph. D. Dissertation, Opole, 2009.
22. Hirsch A.: *Principles of Fullerene Reactivity*. In Topics in current chemistry, 1999, p. 1–65. ■

Aging changes of C₆₀-doped mineral transformer oil

In paper, analysis of influence of aging on the properties of C₆₀-doped mineral transformer oil is presented. Three series of samples were prepared, one with fresh oil and two aged for 24 h and 96 h. Each series consisted of 7 samples of different C₆₀ concentration. All samples were measured against their streaming electrification properties in wireless electrometer setup.

Keywords: mineral transformer oil, nanotechnology, fullerenes, C₆₀

dr inż. Paweł Aksamit

Urodził się w 1983 r. w Opolu. Tytuł magistra uzyskał w 2007 r., a stopień doktora nauk technicznych w 2009 r. – oba na Wydziale Automatyki, Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Jego praca naukowa koncentruje się wokół zagadnień związanych z elektryczną inżynierią materiałową, a w szczególności wokół ciekłych dielektryków. Jest autorem lub współautorem ponad 30 publikacji w czasopismach oraz materiałach konferencyjnych.

e-mail: p.aksamit@po.opole.pl



dr hab. inż. Dariusz Zmarzły, prof. Politechniki Opolskiej

Absolwent Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Opolskiej (2000). Stopnie doktora nauk technicznych (2002) oraz doktora habilitowanego (2006) uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Zajmuje się zagadnieniami dotyczącymi elektryzacji strumieniowej. Jest autorem ponad 150 publikacji. Jest stypendystą Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (2007, 2008). Uzyskał stypendium Ministra dla Wybitnych Młodych Naukowców (2008-2011).

e-mail: d.zmarzly@po.opole.pl

