VI SYMPOZJUM
PROBLEMY EKSPLOATACJI UKŁADÓW IZOLACYJNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA
Zakopane, 23–25 października 1997

Janusz Fleszyński*

O OLEJACH TRANSFORMATOROWYCH W ASPEKTACH TECHNICZNYCH I ŚRODOWISKOWYCH

Streszczenie: Przedstawiono aktualne problemy zagrożenia pożarowego i kompatybilności środowiskowej, dotyczące olejów transformatorowych. Specjalną uwagę zwrócono na problem skażenia olejów mineralnych związkami polichlorowanych bifenyli. Wskazano na nowe oleje syntetyczne, perspektywiczne dla zastosowania w transformatorach.

Słowa kluczowe: olej transformatorowy, zagrożenie pożarowe, ochrona środowiska

1. Wstęp

Oleje mineralne są stosowane od początku rozwoju konstrukcji transformatorów elektroenergetycznych. Są to ciecze tanie, charakteryzujące się przy tym szeregiem dobrych właściwości fizykochemicznych, elektroizolacyjnych i cieplnych. Z tego względu są ciągle powszechnie wykorzystywane we wszystkich rodzajach transformatorów: blokowych, rozdzielczych, trakcyjnych, pomiarowych, probierczych [1]. Bardzo istotną natomiast wadą mineralnych olejów transformatorowych, widzianą w aspektach zagrożenia pożarowego, jest ich łatwopalność.

W latach trzydziestych przemysł chemiczny w USA opracował oleje syntetyczne — polichlorowane bifenyle, które znalazły — w następnych latach — szerokie zastosowanie na świecie. Najpierw wprowadzono pentachlorobifenyl, potem trichlorobifenyl, pod ogólną nazwą oleje PCB (polychlorinated biphenyls) i różnymi nazwami handlowymi: Askarel, Clofen, Pyralen, Sowoł. Oleje te, posiadające

* Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

dużą stałą dielektryczną (5–6), stanowiły bardzo dobry materiał dla przemysłu kondensatorowego.

Niepalność olejów PCB spowodowała również, że napełniono nimi na świecie wiele transformatorów, głównie transformatorów rozdzielczych. W 1968 r. szwedzki mikrobiolog Jensen odkrył jednak, że toksyczne związki PCB przedostają się do środowiska naturalnego i odkładają w tkankach organizmów żywych, co stanowi duże zagrożenie środowiskowe. Od tego czasu zaczął się odwrót od stosowania olejów PCB. Całkowity zakaz ich produkcji wprowadziła w 1972 r. jako pierwsza Japonia, a w następnych latach zakaz ten stał się obowiązujący w innych krajach (USA — 1976 r., Europa — 1985 r.).

Wiele transformatorów wypełnionych olejem PCB znajduje się jeszcze na świecie. Stwarzają one istotne zagrożenie środowiskowe, w tym związane ze stwierdzonymi wielokrotnie skażeniami olejów mineralnych związkami PCB. Z tych względów problemy dekontaminacji transformatorów z olejami PCB oraz kontroli zawartości PCB w olejach mineralnych, są na świecie, i również w Polsce, bardzo aktualne [2, 3].

Na zagrożenia środowiskowe ze strony cieczy izolacyjnych zwraca się na forum międzynarodowym i w niektórych krajach coraz większą uwagę. Prowadzone są toksykologiczne i ekotoksykologiczne badania cieczy izolacyjnych — nowych i już od wielu lat stosowanych, opracowywane są międzynarodowe i krajowe dokumenty normalizacyjne i prawne [1].

Od czasu zakazu produkcji olejów PCB wyspecjalizowany przemysł chemiczny intensywnie poszukuje nowych olejów syntetycznych, spełniających stawiane wymagania techniczne, środowiskowe i ekonomiczne. Osiągnięcia w tym zakresie są już znaczące. Nowe oleje są coraz szerzej stosowane w transformatorach rozdzielczych i pomiarowych (przekładnikach prądowych) i będą stanowić coraz większą konkurencję dla olejów mineralnych [1, 4–8].

Te poruszone problemy i zagadnienia są rozwinięte w następnych rozdziałach referatu.

2. Palność olejów

Awaria transformatora olejowego może być przyczyną groźnego pożaru, np. wskutek przebicia elektrycznego izolacji — prowadzącego do zapłonu łuku, eksplozji kadzi transformatora i rozlania się płonącego oleju. Pożar taki stanowi wielkie bezpośrednie zagrożenie dla znajdujących się w pobliżu ludzi, a także zagrożenie związane z wydzielaniem toksycznego dymu i skażeniem ziemi. Niebezpieczeństwo wystąpienia katastroficznej awarii może być bardzo zmniejszone przez zastosowanie w transformatorach niepalnych lub trudnopalnych cieczy.

Nad nową, kompleksową normalizacją problematyki zagrożeń, związanych z pożarami urządzeń elektrotechnicznych, pracuje Komitet Techniczny 89 IEC, którego jedna z Grup Roboczych (WG-9) zajmuje się zagadnieniami palności cieczy [1].

Zgodnie z dotychczasową, obowiązującą normą IEC 1100 [9], klasyfikacji palności cieczy izolacyjnych dokonuje się na podstawie temperatury zapłonu cieczy t_z oraz

jej wartości opałowej C_o. Klasyfikacja ta dzieli ciecze izolacyjne na klasy oznaczone literami — O, K, L i liczbami — 1, 2, 3, (np. 01, K2,...). Określają one:

- klasa 0 — $t_z \leqslant 300°C$,
- klasa K — $t_z > 300°C$,
- klasa L — t_z niemierzalne,
- klasa 1 — $C_o \geqslant 42\,MJ/kg$,
- klasa 2 — $32\,MJ/kg \leqslant C_o < 42\,MJ/kg$;
- klasa 3 — $C_o < 32\,MJ/kg$.

W IEC rozważa się celowość wprowadzenia nowej klasyfikacji palności cieczy izolacyjnych, uwzględniającej inne ważne właściwości i charakterystyki cieczy, takie jak:

- temperatura zapłonu par oleju,
- temperatura samozapłonu,
- gęstość strumienia wydzielanego ciepła,
- dynamika rozprzestrzeniania się ognia,
- wydzielanie dymu.

W tych aspektach oleje mineralne są groźnymi pożarowo cieczami łatwopalnymi, oleje PCB są cieczami praktycznie niepalnymi, a stosowane obecnie w transformatorach rozdzielczych tetraestry organiczne (rozdz. 5) lub oleje silikonowe — są cieczami trudnopalnymi. Charakterystyki palności tych cieczy przedstawia tabela 1.

Tabela 1. *Charakterystyki palności olejów transformatorowych*

Charakterystyki palności		Oleje mineralne	Oleje syntetyczne		
			Tetraestry organiczne	Oleje silikonowe	Askarele
Klasa		01	K2	K3	L3
Temperatura zapłonu cieczy	[°C]	160	310	330	niemierzalna
Wartość opałowa	[MJ/kg]	45	37	26	2,4
Temperatura zapłonu par oleju	[°C]	140	250	240	niemierzalna
Temperatura samozapłonu	[°C]	230	425–460	395–440	>600
Gęstość strumienia wydzielanego ciepła	[kW/m^2]	1000	500	65–100	brak danych

Wartości zestawione w tabeli 1 pokazują, że oleje silikonowe i tetraestry organiczne nie stanowią pełnych zamienników olejów PCB, w aspektach eliminacji zagrożeń pożarowych. Z tego między innymi względu stosuje się coraz szerzej na świecie niepalną izolację gazową SF_6 w transformatorach rozdzielczych [10].

3. Skażenie środowiska związkami PCB

Toksyczne oleje PCB, których produkcja na świecie jest od dawna zakazana, znajdują się jednak jeszcze w wielu transformatorach i kondensatorach. Substancje te charakteryzują się wysoką chemiczną trwałością, co w połączeniu z niefrasobliwą

praktyką przemysłu i energetyki spowodowało rozprzestrzenianie się PCB w środowisku. Ślady PCB spotyka się obecnie na całym globie ziemskim. Powszechnie wiadomo, że duże ilości mineralnych olejów stosowanych w transformatorach są skażone olejem PCB, nawet jeśli te transformatory nigdy nie były nim napełnione. Ponadto, z powodu prawnych ograniczeń stosowania PCB, duże ilości transformatorów pierwotnie napełnionych PCB zostało opróżnionych i ponownie napełnionych innymi olejami, zazwyczaj mineralnymi. Powstałe nowe napełnienia transformatorów zostały w ten sposób skażone związkami PCB. Olej mineralny, który zawiera więcej niż 50 ppm związków PCB jest obecnie uważany za odpad, którego dekontaminację należy prowadzić pod nadzorem.

Problem PCB dotyczy również Polski. Badania ankietowe zespołu badawczego Instytutu Chemii i Technologii Nafty i Węgla Politechniki Wrocławskiej wykazały, że w południowo-zachodniej części kraju znajduje się 69 transformatorów z 85 tonami PCB. Zebrano również informacje o 11 000 kondensatorów z syciwem PCB [3]. Dla rozwiązania problemu PCB w kraju nie wystarczą dorywcze działania. Muszą być one systematyczne, zarówno w zakresie technicznym jak i prawno-administracyjnym. Do działań technicznych należy zaliczyć szczegółową inwentaryzację czynnych i zepsutych urządzeń zawierających PCB, zorganizowanie systemu selektywnej zbiórki PCB, opracowanie właściwego systemu dekontaminacji PCB i urządzeń. Działania prawno-administracyjne to przede wszystkim: wprowadzenie ustawy o odpadach, która zakazałaby nielegalnego pozbywania się PCB i mieszania z innymi cieczami, wprowadzenie systemu ewidencji odpowiadającego międzynarodowym konwencjom, kontrolę zawartości PCB w innych olejach, w szczególności w mineralnych olejach transformatorowych, według wymagań międzynarodowych norm [2].

4. Kompatybilność środowiskowa olejów

Na kompatybilność środowiskową olejów izolacyjnych zwracać się będzie na pewno coraz większą uwagę. W USA, Japonii, krajach Wspólnoty Europejskiej prowadzi się już kompleksowe badania toksykologiczne i ekotoksykologiczne tych cieczy. Obejmują one różne krótko- i długoterminowe próby:

- toksycznego działania na zwierzęta doświadczalne,
- drażniącego oddziaływania na skórę i oczy,
- działania uczuleniowego,
- zmian genetycznych,
- toksycznego działania na organizmy w środowisku wodnym,
- biodegradalności i możliwości gromadzenia się w tkankach żywych.

Badania wykazały, że oleje mineralne źle rafinowane oraz zestarzone stwarzają już pewne zagrożenie środowiskowe. Zagrożenie środowiskowe ze strony olejów mineralnych bardzo rośnie, gdy zawierają one policykliczne węglowodory aromatyczne (PAH) o rakotwórczym działaniu. Węglowodory PAH mogą zawierać nie tylko oleje zestarzone, lecz również oleje świeże, nawet bardzo dobrze rafinowane. Wśród prac badawczych dotyczących tego problemu szczególne znaczenie mają prace nad roz-

wojem metod analitycznych, umożliwiających stwierdzenie obecności i oznaczenie zawartości w olejach mineralnych rakotwórczych węglowodorów PAH [1].

Szczegółowe informacje dotyczące metod badania i kryteriów oceny kompatybilności środowiskowej olejów izolacyjnych oraz obowiązujących przepisów prawno-administracyjnych w przodujących na świecie krajach przedstawia artykuł [1].

5. Nowe oleje syntetyczne

Przemysł transformatorowy, poszukując zamienników niepalnych olejów PCB, stosuje od wielu lat oleje silikonowe w transformatorach rozdzielczych wymagających specjalnego bezpieczeństwa pożarowego. Oleje te odznaczają się dużą cieplną stabilnością, wysoką dopuszczalną temperaturą pracy, dobrą odpornością na utlenianie, dobrymi własnościami w niskich temperaturach. Są to jednak ciecze drogie i mające z punktu widzenia ochrony środowiska istotne wady — nie są bowiem biodegradalne i trudno rozkładają się w procesie pyrolizy.

Najnowszymi trudnopalnymi olejami transformatorowymi, dość szeroko już stosowanymi w transformatorach rozdzielczych (w Niemczech), są tetraestry organiczne (tetraestry pentaerytritolu). Charakteryzują się one — tak jak oleje silikonowe — wysokimi temperaturami zapłonu par oleju i zapłonu samej cieczy, a wyróżniają się bardzo dużą rozpuszczalnością wody — od 0,1% w temperaturze 20°C do 1% w temperaturze 100°C [4, 5]. Są to jedyne, jak dotychczas, oleje transformatorowe nietoksyczne i w pełni biodegradalne. Zakładając zaostrzenie w przyszłości przepisów prawnych dotyczących ochrony środowiska można sądzić, że ich produkcja i zastosowanie znacząco wzrosną.

Do nowych, perspektywicznych olejów transformatorowych należą również syntetyczne węglowodory aromatyczne [6, 7], posiadające bardzo dobre — w porównaniu do olejów mineralnych — charakterystyki wytrzymałości elektrycznej i wyładowań niezupełnych oraz trochę lepsze od olejów mineralnych właściwości cieplne. Jest także istotne, że oleje te, o ściśle określonym składzie chemicznym, nie zawierają niebezpiecznych węglowodorów PAH. Syntetyczne węglowodory aromatyczne są niestety jeszcze drogie, co ogranicza zakres ich obecnego stosowania (głównie w przekładnikach prądowych).

Dostępność nowych olejów syntetycznych, o bardzo dobrych różnych właściwościach, być może spowoduje istotne zmiany w konstrukcjach i parametrach pracy transformatorów. Zastosowanie tetraestrów organicznych i papierów syntetycznych (aramidowych) pozwoli może na podniesienie dopuszczalnej temperatury pracy transformatorów [8]. Zastosowanie zaś syntetycznych węglowodorów aromatycznych uzasadnić może zwiększenie naprężeń elektrycznych w izolacji i tym samym zmniejszenie gabarytów transformatorów [6, 7]. Osiągnięcie tych perspektywicznych celów wymaga jednak wielu kosztownych badań.

Literatura

[1] **Berger N., Randoux M., Ottmann G., Vuarchex P.**: *Review on Insulating Liquids.* Electra, 1997, no. 171, pp. 33–56

[2] *Determination of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Mineral Insulating Oils by Packed Column Gas Chromatography (GC).* IEC 997, 1989

[3] **Artykuł redakcyjny**: *Kłopoty na drodze do Europy. Polichlorowane bifenyle.* Pryzmat, 1997, nr 95, s. 4

[4] **Borsi H.**: *Dielectric Behaviour of Silicone and Ester Fluids for Use in Distribution Transformers.* IEEE Trans. on Electr. Insul., 1991, vol. 26, no. 4, p. 755–762

[5] **Borsi H., Gockenbach E., Dumke K.**: *A Synthetic Insulating Liquid for Application in Transformers.* 9th Int. Symp. on High Voltage Engineering, Graz 1995, pap. 1025

[6] **Berger N.**: *EXP-7 — a New Synthetic Liquid for HV Transformers.* CIGRE, 1994, Report no. 15-94 (WG-02)

[7] **Gauger G.**: *Edisol TR FLUID.* CIGRE, 1996, Report no. 15–96 (WG-02)

[8] **Dumke K., Borsi H.**: *Investigations on the Breakdown Strength of Fluid Impregnated Insulating Papers.* CIGRE, 1996, Report no. 15–96 (WG-02)

[9] *Classification of Insulating Liquids According to Fire-point and Net Calorific Value.* IEC 1100, 1992

[10] **Mosiński F.**: *Izolacja transformatorów energetycznych. Izolacja gazowa.* Rozdz. w książce „Inżynieria wysokich napięć w elektroenergetyce", Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 1996, s. 237–244

ON THE TRANSFORMER OIL IN TECHNICAL AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

The current problems of the fire hazard and environmental compatibility relating to the transformer oils are described. Special attention is paid on the problem of mineral oils contamination by polychlorinated biphenyl compounds. New synthetic transformer oils are also presented.

Referat opracowano w ramach tematu badań statutowych,
Wybrane zagadnienia inżynierii wysokich napięć (zlec. 341 206).