

Helena Słowikowska<sup>1</sup>, Jerzy Słowikowski<sup>1</sup>, Iwona Łosiewicz<sup>1</sup>, Antoni Hyrczak<sup>2</sup>

## DOŚWIADCZENIA ZE STOSOWANIA CHROMATOGRAFII GAZOWEJ I POMIARÓW ZAWARTOŚCI WODY W DIAGNOSTYCE WYŁĄCZNIKÓW Z SF<sub>6</sub>

**Streszczenie:** Na przykładzie wyników analizy składu gazu w wyłącznikach z SF<sub>6</sub> omówiono aspekt praktyczny stosowania tych badań w diagnostyce aparatury łączeniowej. Badania te są przydatne w kontroli poprawności napełniania urządzeń gazem i wymiany gazu w przypadku zabiegów konserwacyjnych, a także – kontroli szczelności oraz temperatury kondensacji pary wodnej oraz – pośrednio – oceny zużycia dyszy, styków i sorbentów. Obserwacja zmian składu gazu w czasie eksploatacji urządzeń z SF<sub>6</sub>, jak wynika z doświadczeń autorów oraz danych literaturowych, jest istotnym i stosunkowo mało kosztownym narzędziem diagnostycznym.

**Słowa kluczowe:** wyłączniki z SF<sub>6</sub>, diagnostyka, chromatografia gazowa.

### 1. Wstęp

Jednym z ustaleń podjętych na konferencji przedstawicieli państw, członków ONZ, w Kioto (1998r) w sprawie zmian klimatu, było zaliczenie sześćofluorku siarki (SF<sub>6</sub>) do grupy tzw. gazów cieplarnianych tj gazów, których gromadzenie się w atmosferze ziemskiej grozi wystąpieniem niekorzystnych zmian klimatycznych. Skrajny postulat stopniowego wycofywania tego gazu z użytkowania w urządzeniach elektroenergetycznych stoi w sprzeczności z osiągnięciami technicznymi i ekonomicznymi jakie wniosło zastosowanie SF<sub>6</sub> w aparaturze łączeniowej i rozdzielczej. Podkreślić przy tym należy, że jeśli chodzi o gazy to, jak dotąd, SF<sub>6</sub> nie ma konkurenta pod względem właściwości łączeniowych i izolacyjnych. Nie ulega natomiast wątpliwości, że pierwszym warunkiem dalszego stosowania SF<sub>6</sub> jest ograniczenie jego emisji do atmosfery. Konsekwencją bowiem wniosków z Kioto jest zobowiązanie każdego z krajów, użytkowników SF<sub>6</sub>, w tym Polski – do opracowania strategii postępowania w tym właśnie względzie.

Wymieniony powyżej postulat ekologów nie zaskoczył środowisk technicznych. Uprzedzając spodziewane restrykcje, już w 1997r, w ramach działalności Komitetu Studiów

<sup>1</sup> Instytut Elektrotechniki, 04-703 Warszawa

<sup>2</sup> Polskie Sieci Elektroenergetyczne, 00-496 Warszawa

23 „Międzynarodowej Konferencji Wielkich Sieci Elektrycznych” (CIGRE) opracowano raport [1] dotyczący zasad, wymagań oraz procedury postępowania z gazem. Raport ten zawiera wymagania na czystość gazu w eksploatowanych urządzeniach elektroenergetycznych. Celem tych wymagań jest nie tylko utrzymanie odpowiedniego poziomu czystości gazu z punktu widzenia niezawodności pracy urządzenia, ale również – z punktu widzenia możliwości oczyszczania gazu w trybie recyklingu i to recyklingu dokonywanego na miejscu zainstalowania przy pomocy przewoźnego agregatu. Właśnie z tego drugiego powodu, wymagania te są ostrzejsze od wartości, które ocenia się jako krytyczne [2] dla urządzeń (porówn. tabl.1). Wystąpienie tych ostatnich, nie tylko bowiem powoduje zagrożenie awarią, a co najmniej szybkim zużyciem się urządzenia, ale ponadto – znacznie komplikuje i podraża proces recyklingu gazu czyniąc ten proces często nieopłacalnym. Recykling bowiem (lub utylizacja) SF<sub>6</sub> o tym poziomie zanieczyszczeń dokonywana może być tylko przez wyspecjalizowane firmy do których gaz ten, najczęściej – o znamionach produktu trującego – musi być dostarczony. Należy mieć przy tym na względzie, że zgodnie z zasadami strategii ograniczania emisji SF<sub>6</sub>, użytkownik ma do wyboru albo poddanie zużytego gazu procesowi recyklingu albo procesowi utylizacji.

**Tabela 1.** Wymagania na czystość SF<sub>6</sub> w warunkach pracy urządzeń

Rodzaj zanieczyszczenia	Poziom zanieczyszczeń kwalifikujący gaz do recyklingu [1] (wartości graniczne)	Krytyczne koncentracje zanieczyszczeń SF <sub>6</sub> [5]
Powietrze [% obj.]	3%	5% łącznie z CF <sub>4</sub>
CF <sub>4</sub>	-	-
H <sub>2</sub> O [punkt rosy w °C]	Minus 50°C	0°C
Fluorki i tlenofluorki gazów [ppm obj.]	≥100 ppm	≥1000 ppm

Pomiary stanu gazu zainicjowały kraje przodujące technicznie, w tym w szczególności te z nich, w których ze względu na długości linii oraz wynikające stąd wymagania dotyczące niezawodności urządzeń, były i pozostają nadal szczególnie wysokie tj: Japonia, USA i Kanada [patrz m.in. lit. poz. 3, 4, 5].

W Polsce, w szczególności w Instytucie Elektrotechniki, współpraca połączonych Zakładów Wysokich Napięć i Aparatury Rozdzielczej z ośrodkami zagranicznymi oraz CIGRE, począwszy od lat 70-tych, stała się podstawą do preferowania tego typu badań służących zarówno kontroli aparatu przed włączeniem go do ruchu jak też diagnostyce poprawności jego zachowania się w warunkach eksploatacji [6].

Do najważniejszych warunków stawianych czystości gazu w eksploatowanych urządzeniach zalicza się zawartość wilgoci w postaci pary wodnej. Stwierdzono bowiem [3], że kondensacja pary wodnej na powierzchni dielektryka stałego powoduje skokowe obniżenie powierzchniowej wytrzymałości elektrycznej. Obniżenie to może ulec bliżej nieokreślonemu pogłębieniu w obecności kwaśnych, hydrolizujących produktów wtórnych rozkładu SF<sub>6</sub>. Produkty te, jak wiadomo [m. in. 7, 8] tworzą się w łańcuchu reakcji towarzyszących rozkładowi SF<sub>6</sub> spowodowanemu wystąpieniem elektrycznych wyładowań łukowych lub niezupełnych. Na ilość i rodzaj tych produktów, poza parametrami wyładowania, wywierają wpływ zanieczyszczenia gazu parą wodną i tlenem, a także pary metali wywołane wystąpieniem łuku.

Końcowe produkty tych reakcji występują w fazie gazowej (np.  $\text{SO}_2$ ), ciekłej (np. HF) i stałej (proszkowej np.  $\text{CuF}_2$ ).

Mechanizmy powyżej opisanych zjawisk, dzięki licznym badaniom prowadzonym w skali międzynarodowej, zostały dość dobrze rozpoznane. Wyniki tych badań w konfrontacji z doświadczeniami eksploatacyjnymi, które wykazały m.in. występowanie przypadków rozwoju przebiecia pełnego [9], doprowadziły do sformułowania wymagań dotyczących nie tylko granicznej zawartości wody, ale również granicznych zawartości tlenu i tlenofluorków siarki (t.zw. – gazów reaktywnych}. Stwierdzono ponadto, że zarówno para wodna jak i tlenofluorki mogą występować w urządzeniu; w początkowym okresie eksploatacji, pomimo obecności sorbentów, obserwuje się stosunkowo często wzrost ilości pary wodnej w przestrzeni gazowej. Wzrost ten jest na ogół spowodowany dyfuzją wilgoci zaadsorbowanej na powierzchni materiałów wchodzących w skład konstrukcji urządzenia, a w szczególności – zaabsorbowanej we wnętrzu materiałów izolacyjnych. Wilgoć ta bywa trudna do usunięcia przy zabiegach suszenia poprzedzających napełnianie urządzenia gazem na miejscu zainstalowania ze względu na powolność procesów jej dyfuzji. Uwidacznia się to po napełnieniu urządzenia gazem, przy czym z w/w powodów proces ustalania się quasi równowagi pomiędzy stanem zawilgocenia materiału a stanem zawilgocenia gazu może trwać wiele miesięcy. Teoretycznie działanie sorbentu powinno doprowadzić do eliminacji zawilgocenia zarówno gazu jak i materiału. Są to procesy jednak na tyle powolne, zwłaszcza dla obszarów bardziej oddalonych od miejsca lokalizacji sorbentu, że bez ingerencji suszenia gazu w drodze recyklingu, zawilgocenie  $\text{SF}_6$  znajdujące się w wyłączniku może przez długi okres czasu przekraczać wartość graniczną. Wskazują na to również obliczenia teoretyczne cytowane w literaturze przedmiotu [m.in.3].

Drugim powodem zawilgacania się gazu mogą być oczywiście nieszczelności<sup>1</sup>. Rozróżnienie tych dwóch przyczyn jest bardzo istotne dla podejmowania decyzji o doborze procedury zapobiegawczej, Należy przy tym brać pod uwagę, że zarówno w/g zaleceń zawartych w cytowanych dokumentach CIGRE jak i w normie PN-IEC 694 zawierającej postanowienia wspólne, dotyczące wysokonapięciowej aparatury rozdzielczej i sterowniczej, bez względu na zakres wahań ujemnych temperatur w strefie klimatu umiarkowanego, temperatura punktu rosy gazu znajdującego się w urządzeniu nie powinna przekraczać minus 5°C.

Występowanie gazów reaktywnych w wyłącznikach jest oczywistym rezultatem funkcji tych aparatów. Rozprzestrzenianie się pierwotnych produktów rozkładu  $\text{SF}_6$  jest bardzo szybkie. Wskutek tego występują dwa procesy konkurujące: rekombinacji prowadzącej do odtworzenia molekuł  $\text{SF}_6$  oraz reakcji pierwotnych produktów rozkładu  $\text{SF}_6$  z zanieczyszczeniami gazu. Tworzenie się zatem produktów wtórnych, o których była już mowa jest nie do uniknięcia. Prawdopodobieństwo tworzenia się tych produktów wzrasta ze wzrostem zanieczyszczeń gazu tlenem (in. powietrzem) i wodą. Pochłanianie ich przez sorbenty, umieszczone z reguły blisko komory gaszeniowej łuku, odbywa się na zasadzie dyfuzji, a zatem jest procesem znacznie powolniejszym. Chłonność sorbentów, jak wiadomo, jest ograniczona. Tym samym, okres aktywności sorbentu zależy nie tylko od częstości i rodzaju operacji łączeniowych, ale i od poziomu zanieczyszczeń. Pojawienie się zatem gazów reaktywnych

<sup>1</sup> Zgodnie z prawami termodynamiki, w przypadku nieszczelności, ciśnienie cząstkowe pary wodnej wewnątrz urządzenia będzie ulegać zmianie do czasu zrównania się z ciśnieniem cząstkowym pary wodnej panującym na zewnątrz urządzenia.

w przestrzeni gazowej wyłącznika może okazać się bardziej miarodajnym wskaźnikiem zużycia sorbentu aniżeli rejestracja operacji łączeniowych.

Zdarzeniami decydującymi o konieczności dokonania remontu wyłącznika niezależnie od zużycia sorbentu, są: zużycie dyszy i zużycie styków. Szereg doświadczeń wskazuje że wskaźnikami w tym względzie mogą być: przyrost  $CF_4$  jeśli chodzi o dyszę i  $CO_2$  jeśli chodzi o styki.  $CF_4$  jest gazem obojętnym, towarzyszącym wytwarzaniu  $SF_6$ . Z tego względu, jego obecność w czystym  $SF_6$  nie przekraczająca określonej koncentracji, nie jest traktowana jako zanieczyszczenie. Związek ten tworzy się jednak w przypadku oddziaływania wyładowań elektrycznych na materiały organiczne. Na możliwość wykorzystania pomiaru koncentracji, a ściślej przyrostu koncentracji tego związku dla celów diagnostycznych, autorzy referatu zwracali uwagę po pierwszych próbach wykorzystania chromatografii gazowej do diagnostyki urządzeń z  $SF_6$  [6]. Związek ten nie jest bowiem pochłaniany przez sorbenty. Na użyteczność posługiwania się pomiarami  $CF_4$  zwrócił uwagę m.in. Chu [5]. Na możliwość wydzielania się  $CO_2$  z materiałów stykowych w następstwie narażeń łukowych zwrócił uwagę m.in. R.I. Van Brunt [8].

W niniejszym referacie przedstawione zostały wyniki eksploatacyjnych badań diagnostycznych wyłączników na napięcie 123 - 400 kV należących do 2 generacji a mianowicie wyprodukowanych przed 1975r (10ap.) oraz po 1980r (9ap.). Analizą zanieczyszczeń  $SF_6$  objęto: gazy niereaktywne (powietrze,  $CO_2$  i  $CF_4$ ), gazy reaktywne będące produktami rozkładu  $SF_6$  ( $SOF_2$ ,  $SO_2F_2$ ,  $SOF_4$ ,  $SO_2$ ) oraz wodę. Stan gazu oceniano według wymagań zawartych w tabeli 1, a ponadto, ze składu zanieczyszczeń i ich ilości wnioskowano o stanie urządzenia.

Analizę składu zanieczyszczeń (z wyjątkiem wody) przeprowadzono metodą chromatografii gazowej. Główną zaletą tej metody jest jej wysoka czułość, i rozdzielczość umożliwiająca wykonanie pełnego badania zanieczyszczeń  $SF_6$  w pojedynczym cyklu pomiarowym, z próbki – o objętości 1 ml.

W referacie przedstawiono wyniki analizy gazu wyłączników napowietrznych jednocieśnieniowych z izolacją  $SF_6$  na napięcia od 123 do 400kV. Wyłączniki te należały do dwóch generacji; z nich 10 wyprodukowano przed 1975r., a 9 – po 1988r.

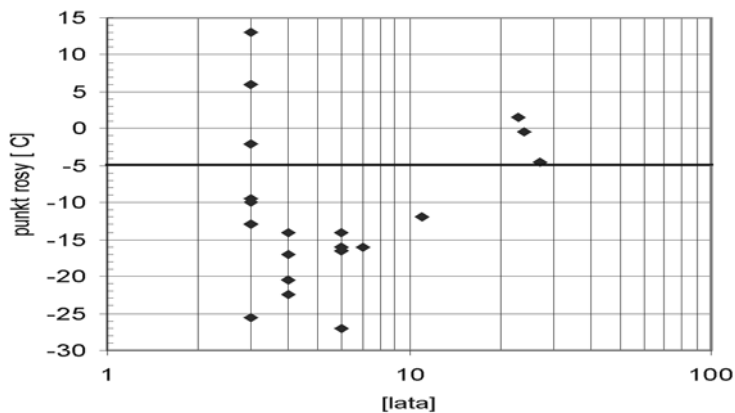
## 2. Wyniki badań

Ze względu na trudności w oszacowaniu liczby i rodzaju łączy poszczególnych wyłączników, wyniki pomiarów przedstawiono w zależności od lat eksploatacji do momentu wykonania badania. Wzięto przy tym pod uwagę wyniki pomiarów koncentracji:  $H_2O$  (w przeliczeniu na temperaturę punktu rosy), powietrza,  $CF_4$ ,  $CO_2$  i tlenofluorków. Zestawiono ponadto wyniki pomiarów zawartości wody w zależności od zawartości powietrza. Uznano, że tego rodzaju zestawienie będzie pomocne w ustaleniu ewentualnego źródła zawilgocenia, tj. dyfuzji wilgoci z materiałów czy też nieszczelności.

Na rys.1 przedstawiono wyniki pomiarów zawartości pary wodnej, w przeliczeniu na temperaturę punktu rosy. Wyniki te uszeregowano według lat eksploatacji badanych wyłączników liczonych do daty wykonania pomiarów.

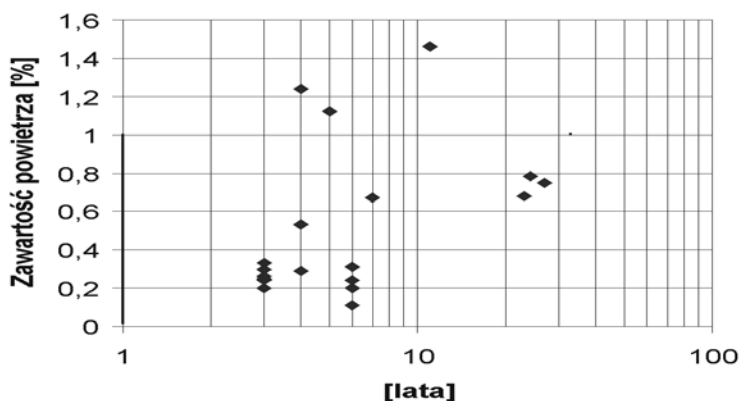
W jednym przypadku, wyłącznika remontowanego po 22 latach eksploatacji na wykres naniesiono wyniki pomiarów wykonane bezpośrednio po remoncie oraz kolejno po zabiegach jego dosuszania. Jak łatwo zauważyć, wymagania na zawartość pary wodnej nie spełniły 4 wyłączniki na ogólną liczbę 19 zbadanych tj. 20%, przy czym w wyżej wymienionym re-

montowanym wyłączniku, po dwóch zabiegach dokonywanych w odstępie 1 roku zawartość wilgoci doprowadzono do poziomu spełniającego wymagania. Osuszaniu poddano również pozostałe 3 wyłączniki.



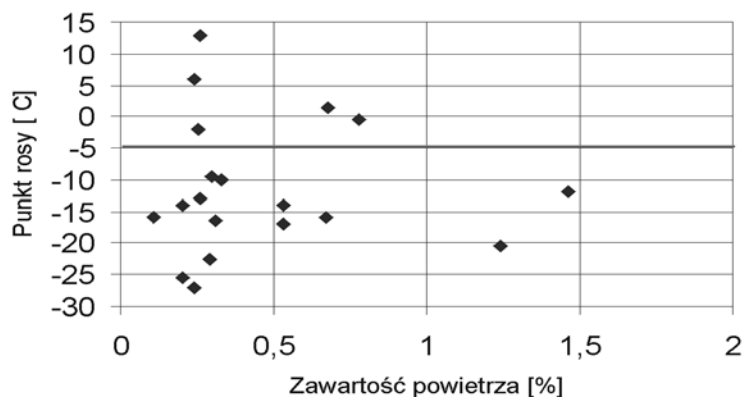
Rys. 1. Zestawienie wyników pomiarów zawartości wilgoci przeliczonych na temp. punktu rosy [°C] w zależności od lat eksploatacji poszczególnych wyłączników

Na rysunku 2 w podobny sposób jak na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów zawartości powietrza. W żadnym z wyłączników nie stwierdzono przekroczeń granicznej koncentracji powietrza.



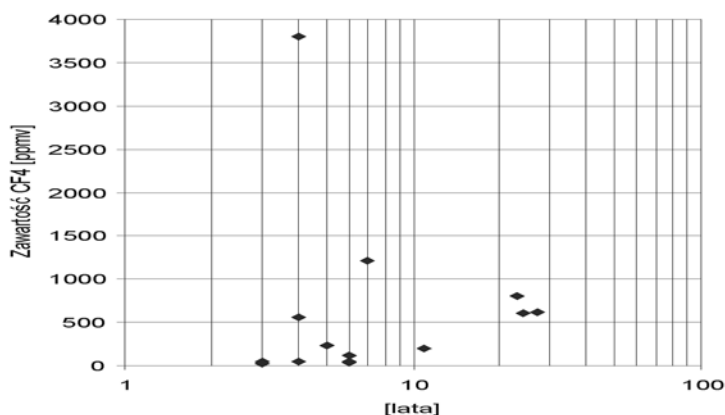
Rys.2. Zestawienie wyników pomiarów zawartości powietrza [%] w zależności od lat eksploatacji poszczególnych wyłączników

Z wyników przedstawionych na rysunku 3 można wnioskować, że przekroczeniem wymagań dotyczących zawilgocenia nie towarzyszyła znacząca koncentracja powietrza, z czego wynika, że w tych wyłącznikach powodem zawilgocenia gazu było niedosuszenie wnętrza wyłącznika w warunkach montażu bądź remontu dokonywanego na miejscu zainstalowania.



**Rys. 3.** Zestawienie wyników pomiarów zawartości wilgoci [punkt rosy w °C] w zależności od zawartości powietrza [%] w poszczególnych wyłącznikach

Na rysunku 4 zestawiono wyniki pomiarów  $CF_4$ . Ze względu na brak punktu odniesienia tj. koncentracji tego gazu przed oddaniem wyłączników do ruchu, wzięto pod uwagę przypadki, w których koncentracja  $CF_4$  wyraźnie przekraczała poziom spotykany w nowym gazie  $SF_6$ . Przekroczenia takie stwierdzono w 4 wyłącznikach w tym tylko w jednym – wyprodukowanym po 88 roku. „Historia” operacji łączeniowych tych wyłączników nie była znana.

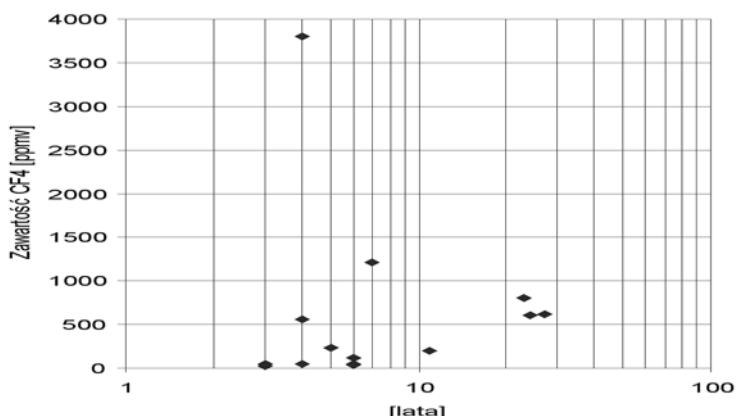


**Rys. 4.** Zestawienie wyników pomiarów zawartości  $CF_4$  [ppmv] w zależności od lat eksploatacji poszczególnych wyłączników

Znaczące ilości  $CF_4$  wykazał wyłącznik eksploatowany przez ponad 20 lat. Wyłącznik ten wykazał ponadto dużą koncentrację  $CO_2$ . Po remoncie, koncentracje tych gazów w  $SF_6$  nie uległy zmianie ponieważ nie ulegają one sorpcji w procesie recyklingu.

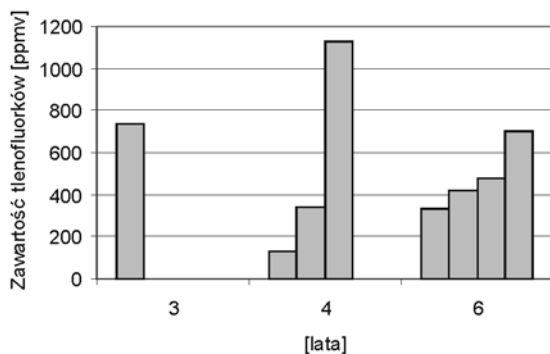
W 2 wyłącznikach dużej koncentracji  $CF_4$  towarzyszyła obecność  $CO_2$  oraz znaczne ilości tlenofluorków. Wystąpił również przypadek wyłącznika, w którym wykryto większe ilości  $CF_4$  i  $CO_2$  przy braku tlenofluorków.

Na rysunku 5 podano wyniki pomiarów CO<sub>2</sub>. Obecność tego gazu stwierdzono w 17 aparatach. W trzech z nich, koncentracja była o rząd wielkości większa od pozostałych.



Rys. 5. Zestawienie wyników pomiarów zawartości CO<sub>2</sub> [ppmv] w zależności od lat eksploatacji poszczególnych wyłączników

Na rysunku 6 zestawiono wyniki pomiarów sumarycznej ilości tlenofluorków. Związki te wykryto w 8 aparatach wyprodukowanych przed 75 rokiem. W dwóch przypadkach, koncentracje tlenofluorków przekroczyły wartości krytyczne (porówn. tabl. 1). Podkreślić jednak należy, że w obu przypadkach poziom zawilgocenia gazu był wyjątkowo niski; temperatura punktu rosy wynosiła -17 i -16°C.



Rys. 6. Zestawienie wyników pomiarów zawartości tlenofluorków [ppmv] odniesione do lat eksploatacji poszczególnych wyłączników

Reasumując, na 19 badanych wyłącznikach 11 wymaga interwencji, w tym 3 – na skutek przekroczonego poziomu zawilgocenia i 8 na skutek przekroczonego poziomu zawartości tlenofluorków (w jednym wyłączniku zawartość tlenofluorków przekroczyła wartość krytyczną).

Przekroczenie poziomu zawartości tlenofluorków stwierdzono wyłącznie w aparatach starszej generacji.

### 3. Wnioski

1. W żadnym z badanych aparatów nie stwierdzono penetracji wilgoci i powietrza na skutek nieszczelności. W jednostkach wykazujących nadmierną ilość pary wodnej powodem tego stanu było niedostateczne wysuszenie wnętrza aparatu podczas montażu lub remontu. Zawilgocenie to ujawnia się po dłuższym okresie eksploatacji. Z tego względu celowa jest obserwacja zmian poziomu zawilgocenia w kilku miesięcznych odstępach czasu od momentu zainstalowania nowej jednostki a także jednostek remontowanych.
2. Należy oczekiwać, że analiza gazów dokonywana równolegle z monitoringiem łączeniowych parametrów elektrycznych i elektromechanicznych stworzą podstawy do bardziej racjonalnego niż dotychczas „zarządzania życiem (life menagement)” wyłączników z SF<sub>6</sub>  
**Uwaga:** Prototypy rejestratorów on line elektrycznych i elektromagnetycznych parametrów łączeniowych, wykonane w NWR IEL są w próbach eksploatacji.
3. Wdrożenie obowiązkowych wymagań dotyczących recyklingu jest niezbędnym warunkiem użytkowania SF<sub>6</sub>.

### Literatura

- [1] *SF<sub>6</sub> recykling Guide*, 117 CIGRE August 1997
- [2] **Niemeyer L.:** *SF<sub>6</sub> recykling in Electric Power Equipment*, 8th Int..Symp. on Gas. Dielectr., 1998
- [3] **Ushio T., Shimura I., Tominaga S.:** *Practical problems on SF<sub>6</sub> Circuit Breakers*, IEEE Winter Power Meeting, New York, Nov. 23,1970
- [4] **Rodney L., Falkner I., House G.:** *Gas Byproducts Analysis as a Maintenance Tool for Sulfurhexafluoride Insulated Switchgear*, Conf. Record od the 1994 intern.Symp. Electr. Insul., USA, June 1994
- [5] **Chu F. Y.,Stuckless H. A.,Braun J. M.:** *Generation and Effects of Low Level Contamination in SF<sub>6</sub> – Insulated Equipment*, Gaseous Dielectrics IV( Christophorou L.G.,Ed.) Pergamon Press
- [6] **Latour-Słowikowska H., Jankowicz S., Słowikowski J., Lampe J.:** *Some remarks on Extrapolation of Laboratory results of SF<sub>6</sub> By-products Analysis to the Application for the Surveillance of GCB*, CIGRE Symposium, S 05-87 Vienna 1987
- [7] **Latour-Słowikowska H., Lampe J., Słowikowski J.:** *On reactions occuring in the gaseous Phase in Decomposed SF<sub>6</sub>*, Gaseous Dielectrics IV Plenum Press, New York, 1984
- [8] **Van Brunt R. J., Herron J. T.:** *Fundamental Processes of SF<sub>6</sub> Decomposition and Oxidation in Glow and Corona Discharges*, IEEE Trans. Electr.Insul.vol.25, No.1.1990.
- [9] **Tymań A., Chu F. Y., Braun J. M.:** *Zmiany na powierzchni izolatora stacji 500 kV pod wpływem niskoenergetycznych wyladowań niepełnych*, VI Symp. „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia”, Zakopane, 1997

#### EXPERIMENTS WITH USING GAS CHROMATOGRAPHY AND MEASUREMENTS OF WATER CONTENTS IN DIAGNOSTIC OF SF<sub>6</sub> CIRCUIT BREAKERS

Based on results of gas composition analysis in SF<sub>6</sub> circuit-breakers, practical aspect of performing such research in diagnostics of switching apparatus is discussed. Such research is useful to check correct filling with gas as well as for exchange (recycling) of gas for maintenance and in order to check tightness and dew point of vapour, and, indirectly, for assessment of wear of jet, contacts and sorbents