



Romuald Włodek*

PROBLEMY EKSPLOATACJI UKŁADÓW IZOLACYJNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Referat wprowadzający

Eksploatacja urządzeń elektrycznych jest elementem pracy systemu elektroenergetycznego, w związku z czym powinna poprzez wysoką niezawodność zapewniać maksymalne zmniejszenie przerw dostawy energii elektrycznej, zgodnie z wymogami aktualnej ustawy o prawie energetycznym. Eksploatacja jest procesem, w którym na efekty naturalnych narażeń roboczych i zakłóceńowych nakłada się świadoma i celowa ingerencja obsługi. Ingerencja ta sprowadza się z jednej strony do czynności, związanych z prowadzeniem ruchu, z drugiej zaś do różnych procedur kontrolnych, badawczych i diagnostycznych, mających na celu utrzymanie urządzeń w stanie niezawodnej pracy. O ile pierwsza z wymienionych grup czynności nie nasuwa szczególnych uwag, to druga — nazwana w skróceniu diagnostyką — ma zasadnicze znaczenie dla spełnienia głównego celu — zapewnienia wysokiej niezawodności urządzeń elektrycznych.

Diagnostyka, aby była skuteczna, musi mieć jednak oparcie z jednej strony w badaniach wielkości charakteryzujących stan układu w toku jego eksploatacji i w rozwoju stosownych do nich metod pomiarowych oraz opracowania wyników, z drugiej zaś w informacjach, pochodzących z wiarygodnej statystyki awaryjności urządzeń wraz z analizą jej przyczyn i skutków. Symposium „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych EUP97” jest w swoim założeniu poświęcone przeglądowi i dyskusji tych zagadnień i ich tendencji rozwojowych. W związku z tym, iż wykorzystanie informacji, czerpanych z eksploatacji urządzeń powinno prowadzić do opracowania nowych konstrukcji, zagadnienia te mają również swój wyraz w programie Symposium EUI'97.

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

Przegląd tematyki referatów zgłoszonych na obecne Sympozjum EUI'97 wskazuje na szeroki i równomierny udział kilku zagadnień, które składają się na najważniejsze problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Należą do nich:

- awaryjność urządzeń, różne jej aspekty i propozycje podejścia metodycznego,
- problemy diagnostyki, doświadczenia w tym zakresie i tendencje, na tle kierunków światowych,
- metody pomiarów wielkości, będących elementami badań diagnostycznych, zarówno elektryczne jak i nieelektryczne,
- analiza narażeń zewnętrznych i wewnętrznych, oddziaływujących na układy izolacyjne, sposoby ich opisu, rejestracji, modelowania matematycznego,
- mechanizmy fizyczne reagowania materiałów i elementów układów izolacyjnych na narażenia, badania modelowe działania narażeń, opisy procesów starzeniowych,
- nowe materiały i konstrukcje oraz postęp w technologii produkcji układów izolacyjnych i urządzeń,
- racjonalna gospodarka materiałowa, w szczególności w aspekcie ochrony środowiska.

Diagnostyka urządzeń wysokiego napięcia obejmuje metodykę podejmowania decyzji o aktualnym stanie danego urządzenia pod względem niezawodnego spełniania jego funkcji eksploatacyjnych oraz ewentualnie określania przewidywanego czasu dalszej pracy. Cel pierwszy — niezawodność eksploatacji — ma obecnie stosunkowo dobrze opracowane podstawy teoretyczne i dostateczną weryfikację eksperymentalną, dzięki którym określone decyzje w przypadkach praktycznych mają zadowalający poziom pewności. Znaczenie tego celu jest zatem doraźne — niedopuszczenie do wystąpienia uszkodzeń, których mechanizm rozwoju jest często losowy. Cel drugi — przewidywanie czasu dalszej pracy — stanowi natomiast od dawna jeden z ważnych kierunków prac w inżynierii wysokich napięć, lecz niestety w związku z bardzo skomplikowanym zespołem czynników wpływających na proces starzenia w warunkach narażeń zespolonych nie można jeszcze dostatecznie pewnie określić odpowiednich funkcji, opisujących ten proces, a zatem wyznaczyć czasu pracy. Głównym problemem jest tu bowiem możliwość skokowego przebiegu zmian efektów działania przede wszystkim wyładowań niezupełnych jako podstawowego elementu narażeń elektrycznych. Można sądzić, że wystarczająco pewne zakwalifikowanie stanu urządzeń w eksploatacji do umownie określonych stopni zagrożenia, którymi mogą być na przykład takie hasła, jak: ostrzeżenie, alarm, zadziałanie zabezpieczenia — powinno stanowić aktualny cel diagnostyki. Aby jednak decyzja taka była oparta na wystarczająco wiarygodnej procedurze, trzeba zapewnić:

- odpowiednią dokładność zbioru informacji o urządzeniu, otrzymanych w drodze odpowiednich pomiarów, stąd potrzeba rozwoju statystyk awaryjności,
- wysoką wierność porównania wyników z zadanymi wzorcami.

Warto nadmienić, że do czynności, poprzedzających te, które dzisiaj określa się pojęciem diagnostyki, przywiązywano zawsze dużą wagę w rozwoju budowy i eksploatacji urządzeń elektrycznych. Należało tutaj opracowywanie przepisów, ustanawianych na różnych poziomach organizacyjnych krajowych i międzynarodowych i określających wymagania i warunki prób profilaktycznych. Zarówno szczegółowy zakres takich

warunków dla poszczególnych urządzeń jak i same zasady przeprowadzania prób i badań a nawet stawiane czasem pytanie o ich celowość mogłyby stanowić obiekt opracowania przeglądowego.

Znaczone zainteresowanie metodami diagnostyki układów izolacyjnych w ostatnich latach pojawiło się w związku z możliwościami podwyższenia dzięki nim niezawodności pracy urządzeń elektroenergetycznych, co w rezultacie może przynieść wymierne efekty ekonomiczne w odniesieniu do urządzeń o dużych mocach i stanowiących ważne elementy systemu (transformatory, duże maszyny, urządzenia rozdzielcze SF₆), oraz ewentualne przedłużenie czasu pracy urządzeń, rozpatrywane jako alternatywa ich wymiany.

Punktem wyjścia każdej diagnostyki urządzeń technicznych jest zatem wykrycie i zakwalifikowanie możliwych naturalnych defektów urządzenia lub struktury jego materiałów, ewentualnie również skutków procesów starzeniowych. Elementami podstawowymi i wyjściowymi procedur diagnostycznych są zatem próby, pomiary i badania.

Próba polega na poddaniu urządzenia działaniu określonych unormowanych narażeń i sprawdzeniu zgodności reakcji układu z odpowiednimi wymaganiami. Odpowiedź uzyskana po przeprowadzeniu próby jest ambiwalentna: spełnia wymagania (+) lub nie spełnia (-).

W wyniku pomiaru otrzymuje się wartość mierzonej wielkości (jednej lub wielu).

Badanie polega na wykonaniu określonych procedur prób i pomiarów, w wyniku których dostarcza ono funkcji empirycznych jednej lub wielu zmiennych.

Odpowiedzią minimalną w procedurze diagnostycznej jest arbitralnie określone prawdopodobieństwo uszkodzenia układu: niskie lub wysokie. Odpowiedzią maksymalną natomiast może być (o ile dany proces jest wystarczająco rozpoznany) określenie zapasu czasu pracy układu, z uwzględnieniem uprzednio wymienionych na ten temat uwag.

Podczas eksploatacji układu izolacyjnego następują pod działaniem narażeń zmiany jego stanu, mogące wpływać na niezawodne spełnianie funkcji użytkowych układu. Narażeniem, działającym na układ izolacyjny jest czynnik, dostarczający do układu energię o określonej postaci. Układ izolacyjny jest systemem, w którym energia, wprowadzona podczas działania narażeń, zostaje rozproszona w formie ciepła lub po przekroczeniu odpowiednich barier potencjału, aktywowane zostają procesy fizyczne lub chemiczne. Aktywacja procesów fizycznych powoduje takie zjawiska jak: dyfuzja (gazów, wilgoci), rozproszenie różnych materiałów, pęcznienie, nasycanie, destrukcja na poziomie nadmolekularnym (np. zjawisko „drzewienia”). Aktywacja procesów chemicznych powoduje takie zjawiska jak: utlenianie, polimeryzacja, depolimeryzacja (degradacja). Ich następstwem są procesy starzenia. Główne założenie technik diagnostycznych polega na przyjęciu znajomości zmian fizyko-chemicznych, zachodzących podczas starzenia i powodujących mierzalne zmiany właściwości dielektrycznych izolacji. Zachodzące podczas starzenia duże zmiany tych wielkości zwykle wskazują na poważną degradację układu izolacyjnego, jednak z drugiej strony ich niewystępowanie nie może jeszcze być pewną informacją o braku takiej degradacji i na tym między innymi polegają trudności niezawodnych, jednoznacznych procedur diagnostycznych.

Aktualnie metody elektryczne oceny stanu układu izolacyjnego można podzielić na dwie grupy, wykorzystujące odmienne zasady. Do pierwszej należą metody detekcji i interpretacji zjawisk relaksacyjnych, do drugiej — metody detekcji sygnałów generowanych z powodu efektów nieliniowych o charakterze stochastycznym.

Obszerna grupa metod nieelektrycznych stanowi odrębny, bardzo rozległy dział technik badawczych. Liczne metody analiz chemicznych oraz wykrywania zmian fizycznych, jak pomiary wielkości cieplnych, reologicznych, termograwimetria, służą do diagnostyki poprzez odpowiednie korelacje z właściwościami elektrycznymi dielektryków.

Obecnie obserwuje się tendencje do racjonalizacji organizacji i zakresu czynności zmierzających do postawienia diagnozy o stanie urządzenia elektrycznego. Stopniowo pojawia się świadomość, że racjonalizacja diagnostyki musi mieć na celu minimalizację kosztów eksploatacji urządzeń. Jeśli tak, to jej podstawą powinno być dobre rozpoznanie zawodności dostawy energii z powodu awaryjności urządzeń elektrycznych. To z kolei wymaga, aby tradycyjnie traktowaną statystykę uszkodzeń wiązać z ich skutkami w postaci przerw pracy i dostawy energii, w sposób maksymalnie możliwie analityczny, oraz z próbami opisów rozkładów prawdopodobieństwa tych wielkości. W literaturze spotkać można — referowane również na niniejszym Sympozjum EUI'97 — sugestie wprowadzenia opisowej klasyfikacji stopnia zagrożenia urządzenia i skutków jego uszkodzenia oraz oparte na niej zalecenia odnośnie ważności wymaganej kontroli jego stanu, od braku takiej kontroli aż po ciągły monitoring urządzenia.

Optymalizacja czynności eksploatacyjnych wymaga między innymi podejmowania działań remontowych lub modernizacyjnych w takim terminie, aby uprzedzić występowanie zakłóceń z częstotliwością większą od uznanej za dopuszczalną. Na przykład w przypadku linii napowietrznych, gdzie uszkodzenie izolatora powoduje w skutkach przerwę w pracy linii i zasilania, wskazanym jest wdrożenie metod diagnostycznych, niezawodnie wskazujących potrzebę wymiany izolatorów. Nasuwa się przy tym zasadnicze pytanie o częstość, szerokość i głębokość badań diagnostycznych. Wydaje się, że muszą one być rozpatrywane kompleksowo z punktu widzenia celu — zapewnienia niezawodnej eksploatacji. Problem częstości badań profilaktycznych można rozpatrywać według różnych modeli. Najprostszy z nich optymalizuje częstość badań ze względu na minimum łącznych kosztów stosowania określonych metod i procedur diagnostycznych oraz kosztów strat w przypadku ich niestosowania, zatem tylko te wielkości muszą być znane. Komplikuąc problem, można wprowadzić doń metody znane w teorii profilaktyki urządzeń technicznych, z uwzględnieniem specyfiki odnośnie do urządzeń elektroenergetycznych, otrzymując — stosownie do przyjętych założeń — różne modele optymalizacyjne. Istotne znaczenie ma przy tym pytanie, czy znane są rozkłady czasów poprawnej pracy obiektu, zwykle wykładnicze, aczkolwiek są podstawy do przyjęcia innych ich typów, oraz rozkłady czasów przerw pracy. W przypadku niepełnej informacji na ten temat znane są również strategie obsługi, minimalizujące maksymalne oczekiwane koszty eksploatacji obiektu. W każdym razie racjonalizacja badań diagnostycznych wymaga uporządkowania i regularnego prowadzenia statystyki awaryjności urządzeń elektrycznych. W tej dziedzinie były w kraju dobre doświadczenia i sądzić można, że są one kontynuowane w nowej struk-

turze organizacyjnej elektroenergetyki. Konieczne jest jednak wprowadzenie do niej elementów powiązanych ze skutkami zarówno w odniesieniu do regenerowanych lub wymienianych urządzeń, jak i w odniesieniu do skutków przerw w dostawie energii dla odbiorców. Również wskazanym byłoby podjęcie starań o opracowanie opisów formalnych typów rozkładów prawdopodobieństwa poprawnej pracy poszczególnych urządzeń i rozkładów czasów przerw eksploatacyjnych. Odnosząc się już szczegółowo, w charakterze przykładu, do jednego z problemów, zgłaszanych w referatach, zwraca uwagę znaczną awaryjność linii kablowych w kraju, około 4 krotnie większa w porównaniu do linii napowietrznych a w odniesieniu do analogicznych danych zagranicznych większa o około rząd wartości. Niezbędna jest tu wnikliwa analiza przyczyn, w szczególności poparta danymi z badań modelowych. Wynika stąd również celowość wprowadzenia nowych, nieniszczących metod detekcji defektów w liniach kablowych.

Dziedzina badań diagnostycznych jest reprezentowana obszernie w materiałach Sympozjum EUP'97 i obejmuje różne urządzenia: generatory, transformatory, kable i ich osprzęt, łączniki, izolatory porcelanowe. Szczególnie obszernie przedstawia się tematyka transformatorów, obejmując zagadnienia od opisu podstaw fizykalnych działania metod pomiarowych aż po system ciągłego monitoringu, kompleksowo ujmujący nadzór nad pracą tych obiektów. Reprezentowane są metody elektryczne, w szczególności pomiary wyładowań niezupełnych w różnych aspektach i stosujące obecnie procedury adaptowane z teorii sygnałów w celu identyfikacji źródeł wyładowań oraz eliminacji zakłóceń. Wprowadzenie podstaw teorii sygnałów do badań układów izolacyjnych było naturalną konsekwencją postępu w zakresie urządzeń pomiarowych i wspomaganych komputerowo metod opracowywania wyników. W szczególności powstała dzięki technice mikroprocesorowej możliwość pomiarów w czasie rzeczywistym dała podstawy do realizacji ciągłego monitoringu stanu układów izolacyjnych ze względu na działanie istniejących już defektów oraz ze względu na ich powstawanie w rezultacie procesów eksploatacyjnych. Przedstawione są następnie różne aspekty metod akustycznych w detekcji i pomiarach wyładowań niezupełnych: podstawy fizykalne, skalowanie, próby identyfikacji źródeł. Znajdują się w programie problemy zastosowania metod pośrednich: pomiarów prądów termicznie stymulowanych oraz pomiarów zmian potencjału powierzchniowego do oceny procesu starzenia materiałów.

Mechanizmy fizykalne reagowania materiałów i modeli układów izolacyjnych na różne narażenia oraz ich efekty przedstawione są w oddzielnej grupie referatów i dotyczą różnych rodzajów materiałów oraz rozmaitych typów narażeń: atmosferyczne, elektryczne ii. Aspektami aplikacyjnymi są na przykład propozycje modelowania matematycznego procesów starzeniowych, mające znaczenie dla predykcji ich skutków, lub propozycje kwalifikacji materiałów pod względem odporności na starzenie elektryczne.

W zakresie analizy narażeń reprezentowane są zarówno przepięcia pochodzenia atmosferycznego, ich rejestracja na terenie kraju w specjalnie zbudowanym do tego celu systemie, modelowanie matematyczne skutków w liniach napowietrznych i kablowych jak i przepięcia łączeniowe i ich rola w szczególności w odniesieniu do transformatorów i kabli. Odnośnie do przepięć łączeniowych warto zwrócić uwagę na ich znaczenie jako czynnika inicjującego proces degradacji i podtrzymującego jego dalsze działanie.

Analizowane są możliwości wzrostu narażeń cieplnych w kablach z powodu prądów w żyłach powrotnych oraz sposoby modelowania narażeń w kablach. Stosowane do tego celu narzędzia z programu EMTP/ATP znajdują zastosowanie również w innych zagadnieniach referowanych na Sympozjum EUI'97.

Tematyka kablowa, oprócz miejsc uprzednio wymienionych, reprezentowana jest również w referatach, opisujących nowe konstrukcje i materiały.

W obszernej tematyce linii napowietrznych przedstawione są problemy działania narażeń zabrudzeniowych, ich modelowania, wpływu na wytrzymałość elektryczną izolatorów a także nowoczesne konstrukcje mające zmniejszyć znaczenie wpływu tych narażeń.

Wymienione tematy zawierają zarówno liczne doświadczenia praktyczne jak i wyniki badań naukowych a także propozycje metodyczne, na przykład w zagadnieniach awaryjności i diagnostyki. Stanowią dobrą podstawę dyskusji, w tym również stwarzającej możliwość wspólnych wniosków o szerszym zakresie zastosowania.

PROBLEMS OF HIGH VOLTAGE INSULATING SYSTEMS EXPLOITATION

In this paper the main topics of the Proceedings of Symposium "Problems of High Voltage Insulating Systems Exploitation EUI'97" have been presented.

They can be summarized as follows:

- failure statistics of apparatus, their different features and proposals of methodical description,
- problems of diagnostic, practical experience and tendencies in this matter,
- measurements of quantities, which are elements of diagnostic procedures, both electrical and nonelectrical ones,
- analysis of external and internal stresses, acting in insulating systems, methods of their description, registration, mathematical modelling,
- physical mechanisms of the reaction of materials and insulating systems on stress operation, investigations, ageing process description,
- new materials and constructions and development in the technology of high voltage insulating systems,
- materials management, particularly in ecological aspect.

Each of above mentioned themes is represented by the papers, describing the actual stage of practical experience, research or technical proposals. Conclusions from the papers enable the discussion to be performed both in relation to particular themes or in more common aspects.