

Seminarium
Postępy w Technice Wysokich Napięć
100. Rocznica Urodzin Profesora Stanisława Szpora
16 maj 2006

**TECHNIKA WYSOKICH NAPIĘĆ W KATEDRZE ELEKTROENERGETYKI
NA WYDZIALE ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I ELEKTRONIKI
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**

**Barbara FLORKOWSKA, Romuald WŁODEK, Jakub FURGAŁ
Wiesław NOWAK, Marek SZCZERBIŃSKI, Paweł ZYDRON**

Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel: 012-6172835, fax: 012- 6345721; e-mail: beflor@agh.edu.pl

Streszczenie:

W artykule przedstawiono technikę wysokich napięć, jako dziedzinę prac badawczych realizowanych w Katedrze Elektroenergetyki AGH w okresie kilkudziesięciu lat. Rozwijając się, dziedzina ta obejmowała coraz szerszy zakres problematyki wysokonapięciowej, zarówno jej aspekty teoretyczne, jak i badania eksperymentalne w przystosowywanym do coraz nowych zadań Laboratorium Wysokich Napięć. Załączony przegląd prac badawczych obejmuje wybrane zagadnienia realizowane najbardziej nowoczesnymi metodami pomiarowymi i narzędziami informatyki.

Słowa kluczowe: technika wysokich napięć, układy izolacyjne, przebiegi, pola elektromagnetyczne, diagnostyka

1. WPROWADZENIE

Początek historii techniki wysokich napięć jako kierunku nauczania i prac naukowych w obszarze elektroenergetyki na obecnym Wydziale EAIiE sięga roku 1953, gdy utworzona została Katedra Urządzeń Sieci Elektrycznych. Jej założycielem i organizatorem był prof. dr inż. Stanisław Bładowski, wybitny specjalista w tej dziedzinie, który połączył swoje obszerne doświadczenie praktyczne z głęboką wiedzą teoretyczną i dorobkiem naukowym. Profesor St. Bładowski nadał profil naukowy i dydaktyczny Katedrze USE i zainicjował szereg tematów badawczych, które ulegając w toku wielu następnych lat naturalnemu rozwojowi i modyfikacjom stały się źródłem wykształcenia licznych pracowników naukowych oraz bardzo dobrych specjalistów pracujących w różnych dziedzinach przemysłu.

Problemy techniki wysokich napięć związane były zawsze z tematyką sieci i urządzeń elektrycznych, szczególnie w zakresie ich eksploatacji. Kontakty przemysłowe Profesora Bładowskiego przynosiły wymierne skutki w postaci wielu opracowań, ekspertyz i opinii z tej dziedziny. Wieloletnia współpraca z przemysłem kablowym owocowała szeregiem prac badawczych nad zagadnieniami izolacji kabli wysokich napięć, ich obciążalności i optymalizacji konstrukcji, wykonywanych zarówno w laboratorium wysokich napięć ówczesnej Katedry USE, jak i w laboratoriach Krakowskiej Fabryki Kabli. Dla prowa-

żenia badań w podstawowych dziedzinach techniki wysokich napięć rozbudowywane było Laboratorium Wysokich Napięć, wyposażone w źródła napięcia wysokiego przemiennego i udarowego. Prace z dziedziny przebiegów i ochrony odgromowej oraz kontakty międzynarodowe i zainteresowania profesora Bładowskiego sprawiły, iż powierzono Polsce zorganizowanie po raz pierwszy VIII Międzynarodowej Konferencji Ochrony Odgromowej. Odbyła się ona we wrześniu 1965 roku w Krakowie, zorganizowana przez Polski Komitet Ochrony Odgromowej, Katedrę Urządzeń Sieci Elektrycznych, przy współpracy Krakowskiego Oddziału SEP. Uczestniczyło w niej około 80 osób z kraju i około 30 z zagranicy, wśród nich między innymi profesorowie K. Berger, V.Fritsch, J. L. Jakubowski. Była to pierwsza konferencja z tej serii w tej części Europy. Warto przypomnieć, iż językami oficjalnymi Konferencji były ustalone jeszcze przez jej twórców niemiecki i francuski.

W działalności naukowej Katedry na szczególną uwagę zasługuje rozwinięcie badań nad mechanizmami wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokich napięć. Badania te skupiały się pierwotnie w szczególności nad oceną izolacji papierowo-olejowej kabli elektroenergetycznych i kondensatorów, a w następnych latach - nad oceną wprowadzanych wówczas do układów izolacyjnych polimerów syntetycznych, takich jak polietylen, politereftalan etylenu, żywice epoksydowe i inne. Głównym osiągnięciem w tej dziedzinie było wprowadzenie w badaniach wyładowań niezupełnych metod detekcji i analizy sygnałów w oparciu o adaptowaną aparaturę stosowaną w fizyce jądrowej i stworzenie podstaw metody analizy amplitudowej wyładowań niezupełnych [3]. Metoda ta, wdrożona w kraju stała się w następnych latach standardem w badaniach wyładowań niezupełnych w różnych laboratoriach na świecie. Wyniki badań prezentowano na konferencjach krajowych i zagranicznych, na posiedzeniach grup roboczych CIGRE i innych.

W dalszych latach rozwój badań w dziedzinie wyładowań niezupełnych doprowadził do opracowania w Katedrze zespołu metod badawczych układów izolacyjnych nowych generacji, w tym do stworzenia

systemów pomiarowych wyładowań niezupełnych i rejestracji obrazów fazowo-rozdzielczych [4, 9, 10, 14, 26, 31, 59]. Prace badawcze nad mechanizmami wyładowań niezupełnych, doбором materiałów do wysokonapięciowych układów izolacyjnych, optymalizacją ich konstrukcji ze względu na narażenia eksploatacyjne, dały początek dziedzinie rozwijanej od wielu lat w Katedrze, jaką jest diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych.

Zespół krakowski zorganizował w 1972 roku w Krościenku nad Dunajcem I Sympozjum „Problemy wyładowań niezupełnych”, które zgromadziło uczestników z wszystkich ówczesnych zespołów uczelnianych i znaczących resortowych i spełniło rolę niezwykle wartościowego w owych latach forum wymiany informacji naukowej. Powodzenie tego sympozjum sprawiło, że przyjęło ono stałą formę i poszerzając stopniowo profil programowy powtarzane było w kilkuletnich odstępach. Ostatnio organizowane, XI. Sympozjum „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia” odbyło się w Krynicy we wrześniu 2007 roku z udziałem gości z USA, Kanady, Australii, Słowacji i Czech. Referaty prezentowane podczas Sympozjów były drukowane w materiałach sympozjalnych, stanowiących wydawnictwa specjalne, a w latach 2003, 2005 i 2007 były wydawane w ramach Przeglądu Elektrotechnicznego - Konferencje.

Gdy w latach 1976–1990 w ówczesnym Ministerstwie Nauki i Szkolnictwa Wyższego zorganizowany został Resortowy Program Badań „Wyładowania elektryczne w gazach”, w jego ramach działała grupa robocza skupiająca kilka ośrodków krajowych, zajmujących się problematyką wyładowań elektrycznych w układach izolacyjnych, w której koordynującą rolę kierownicy programu: prof. Z. Ciok z Politechniki Warszawskiej (w latach 1976-1981) i prof. Cz. Królikowski z Politechniki Poznańskiej (w latach 1981-1990), powierzali zespołowi krakowskiemu. Warto przypomnieć, że pierwsze Sympozjum sprawozdawcze w ramach pierwszego pięcioletniego cyklu badań w tym programie zostało zorganizowane przez ten zespół w maju 1977 roku w ośrodku PAN w Mogilanach k. Krakowa. Doroczne sympozja sprawozdawcze z realizacji tematów w programie resortowym skupiały się wokół tematyki wysokich napięć i efektów oddziaływania pól elektrycznych w materiałach i układach izolacyjnych: gazowych, próżniowych, stałych i ciekłych. Efektem tych i wymienionych uprzednio przedsięwzięć były trwałe kontakty naukowe zarówno organizacyjne jak i personalne, trwające do chwili obecnej. Należy oddać szacunek prof. J. I. Skowrońskiemu z Politechniki Wrocławskiej, któremu zespół krakowski zawdzięczał wiele wartościowego wsparcia i rad. Ośrodek krakowski skupiał szczególne wysiłki nad badaniami mechanizmów fizykalnych wyładowań niezupełnych zarówno w powietrzu, jak i w materiałach stałych i ciekłych. Owocem tych prac były następnie monografie [5, 6, 56, 57,7] oraz książka [10] a także liczne publikacje w czasopiśmie i na sympozjach krajowych i zagranicznych [np. 11-16, 26,29, 33, 34, 58]. Jako znaczące osiągnięcie można uznać prace nad oceną stochastycznych struktur zbiorów impulsów wyładowań w powietrzu, stanowiących źródła niezależne i zależne [27, 28]. Publikacja [27] była i jest często cytowana przez autorów zagranicznych.

W grupie tematycznej dotyczącej działania narażeń zespolonych w wysokonapięciowych układach izolacyjnych należy wymienić wieloletnie badania laboratoryjne dla oceny efektu ich synergizmu w polimerowych układach izolacyjnych. Sformułowano zasady optymalnego opisu procesu starzeniowego kondensatorów w rezultacie narażeń wieloczynnikowych [49]

Gdy miejsce głównych problemów rozwoju ekstensywnego i zapewnienia wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną zajęły nowoczesne zagadnienia ekonomicznej eksploatacji systemów, sieci i urządzeń elektroenergetycznych, energooszczędnych technologii oraz mające duże znaczenie społeczne odpowiedzi na pytania o nieszkodliwość oddziaływania urządzeń na ludzi i środowisko, zespół Katedry dostosowywał się do nich podejmowaniem odpowiednich tematów naukowych. W ten sposób kształtował się profil naukowy Katedry Elektroenergetyki i wraz z nim rozwijała jego kadra naukowa a także, poprzez liczne kontakty z innymi ośrodkami jak: recenzje, promocje, sympozja itp. działania, uczestniczono w życiu naukowym i jego rozwoju w kraju.

Prawidłowa i zgodna z aktualnymi tendencjami eksploatacja sieci elektroenergetycznych wysokich napięć wymaga rozwoju całej jej struktury technicznej w takim stopniu, aby zapewnić niezawodną dostawę energii jako główny cel działania systemu elektroenergetycznego. Zagadnienia te należą do dziedziny techniki wysokich napięć i urządzeń elektrycznych. Wyrażając ten cel inaczej można stwierdzić, że prace naukowe w dziedzinie wysokich napięć i urządzeń elektrycznych zmierzają do uzyskania postępu w budowie urządzeń, łączącego optymalne w danych warunkach ich wymiary z niezbędną niezawodnością eksploatacyjną oraz nieszkodliwością dla środowiska i ludzi. Oszczędność wymiarów ma wielorakie znaczenie i wynika w największym skrócie z potrzeby oszczędności materiałów i miejsca. Powiązania tego celu ze współczesnymi tendencjami w kompleksowym zadaniu energooszczędności jest oczywiste. Głównymi dziedzinami prac naukowych w tym kierunku są: inżynieria materiałowa, dostarczająca nowych materiałów wszystkich rodzajów stosowanych w budowie urządzeń, badania mechanizmów działania różnych form narażeń i procesów starzeniowych w eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, szeroko rozumiana diagnostyka urządzeń, w tym rozwój metod detekcji i pomiarów dla celów diagnostycznych oraz rozwój procedur wiarygodnej interpretacji ich wyników. Efektami oczekiwanymi są z jednej strony nowe materiały o żądanych właściwościach eksploatacyjnych, z drugiej zaś nowoczesne metody kwalifikacji materiałów i urządzeń elektroenergetycznych po procesie produkcyjnym oraz odpowiednio pewna diagnostyka ich stanu w eksploatacji. Jako przykład można wymienić dielektryki zapewniające wyższą odporność na działanie narażeń zewnętrznych i wewnętrznych, materiały o właściwościach zależnych w zaprogramowany sposób od temperatury, materiały o charakterystykach nieliniowych i inne.

Eksploatacja układów izolacyjnych wysokiego napięcia jest złożonym, wieloczynnikowym procesem techniczno-organizacyjnym, w którym obiekty te podlegają działaniu zespołu narażeń wewnętrznych i zewnętrznych oraz działaniu zamierzonej ingerencji obsługi. W wyniku tego układy izolacyjne podlegają zmianom swoich

właściwości eksploatacyjnych, których znajomość ma istotne znaczenie dla operacyjnej pracy systemu elektroenergetycznego. Prace nad zagadnieniami racjonalnego programowania procedur diagnostycznych i nadzorczych w eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych, należą do ogólnego i aktualnego obecnie problemu zarządzania majątkiem w elektroenergetyce [22, 42].

Wśród narażeń szczególna rola przypada - zwłaszcza wobec wzrastających wymagań odnośnie do kompatybilności elektromagnetycznej - przepięciom różnych rodzajów. W Katedrze Elektroenergetyki temat ten realizowany jest zarówno w odniesieniu do przepięć atmosferycznych w aspekcie modelowania ich mechanizmów fizykalnych [23, 43, 48, 55], jak i wewnętrznych, stanowiących zagrożenia dla urządzeń elektroenergetycznych, w tym szczególnie dla transformatorów [39].

Liczne prace naukowe i naukowo-techniczne w Katedrze Elektroenergetyki dotyczą problemów oddziaływań środowiskowych w elektroenergetyce. Opracowano w tym celu metody i programy komputerowe obliczeń rozkładów pól elektrycznych i magnetycznych w otoczeniu urządzeń wysokiego napięcia [18] oraz zbudowano w laboratorium odpowiednie urządzenia pomiarowe i stanowisko legalizacyjne do tych celów [1]. Problem oddziaływań polowych ze względu na jego znaczenie w świadomości społecznej jest stale przedmiotem publikacji, ekspertyz i innych działań prowadzonych w Katedrze [np. 46, 24, 25]. Zagadnienia te wkraczają stopniowo do szerokiej problematyki kompatybilności elektromagnetycznej.

Aktualne tendencje w elektroenergetyce są źródłem badań i rozwoju w dziedzinie nazywanej tradycyjnie techniką wysokich napięć, pozwalając na syntetyczne spojrzenie na zasadniczy cel elektroenergetyki, jako dziedziny gospodarki i jej znaczenie społeczne.

W dalszym ciągu artykułu przedstawiono charakterystykę wybranych kierunków prac badawczych w Katedrze Elektroenergetyki AGH. Do zespołu tych prac realizowanych w dziedzinie, jaką jest technika wysokich napięć należą:

- prace w dziedzinie diagnostyki eksploatacyjnej urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia, rozpatrywane w aspekcie możliwości rozwoju nowoczesnych metod oceny stanu urządzeń, w tym metod cyfrowego przetwarzania sygnałów, systemów monitoringu, należące do współczesnej strategii eksploatacji urządzeń w elektroenergetyce,
- analizy i modelowanie narażeń eksploatacyjnych układów elektroenergetycznych, w tym narażeń wewnętrznych, związanych z działaniem silnych pól elektrycznych w warunkach roboczych, narażeń przepięciowych powstających podczas czynności łączeniowych oraz narażeń zewnętrznych, związanych z przepięciami bezpośrednimi i indukowanymi, powstającymi podczas wyładowań atmosferycznych,
- problemy ochrony przeciwprzepięciowej, a więc metody ochrony, urządzenia dla ich realizacji, zasady doboru elementów konstrukcyjnych w szczególności o charakterystykach nieliniowych,

- problemy oddziaływania pól elektromagnetycznych w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych - aspekty techniczne i ekologiczne.

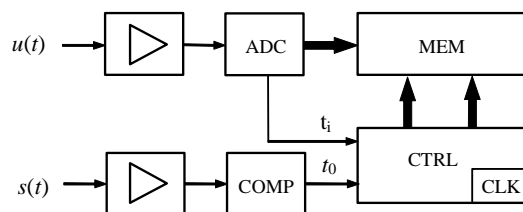
2. BADANIA WYŁADOWAŃ NIEZUPEŁNYCH, POMIARY, ANALIZY MECHANIZMÓW

Prace nad mechanizmami powstawania i rozwoju wyładowań niezupełnych mają charakter zarówno badań podstawowych, jak również celem ich jest uzyskanie wystarczających podstaw dla opracowania nowych metod diagnozowania urządzeń znajdujących się w eksploatacji [6, 10, 28].

Możliwości zastosowania różnych metod rejestracji sygnałów wyładowań niezupełnych są w głównej mierze zależne od rodzaju badanego obiektu (np. linie napowietrzne, transformatory, kable, układy z izolacją gazową SF₆). Wynika to przede wszystkim z różnic parametrów czasowych impulsów wyładowań oraz charakterystyk transmisyjnych obiektów.

Wiarygodna diagnostyka stanu układów elektroizolacyjnych wysokiego napięcia jest zależna od rozwiązania zarówno problemów technicznych, jak i badawczych, związanych z: detekcją i rejestracją sygnałów wyładowań niezupełnych, także w warunkach silnie zakłóconego, przemysłowego środowiska elektromagnetycznego; wyborem odpowiedniej metody analizy danych pomiarowych, w tym również określeniem parametrów uznanych za diagnostycznie istotne; tworzeniem wiarygodnej i wystarczająco szerokiej bazy danych referencyjnych, stanowiących podstawę dla oceny stanu układu; możliwościami oszacowania wpływu innych czynników zewnętrznych np. odkształcenia napięcia probierczego, na rezultaty uzyskiwanych pomiarów i interpretacji.

Ważnym etapem rozwoju metod badania wyładowań niezupełnych było wymienione wcześniej zastosowanie amplitudowej analizy wielokanałowej [3]. Wśród obecnych tendencji rozwojowych metod analizy wyładowań niezupełnych wymienić należy metody bazujące na informacji o fazowo-amplitudowej strukturze zbiorów impulsów, określane również mianem metod fazowo-rozdzielczych oraz metody analizy fazowo-częstotliwościowej. Prowadzone prace pozwoliły na stworzenie unikalnych metod i przyrządów badawczych umożliwiających dokonywanie analiz tego typu [10, 31, 59]. Rysunek 1 przedstawia uproszczony schemat blokowy układu rejestracji amplitudy impulsów wyładowań niezupełnych z równoczesnym zapisem informacji o czasie/fazie ich wystąpienia.

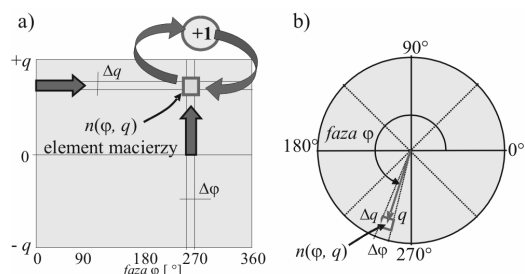


Rys. 1. Schemat blokowy układu fazowo-rozdzielczej rejestracji impulsów wyładowań niezupełnych

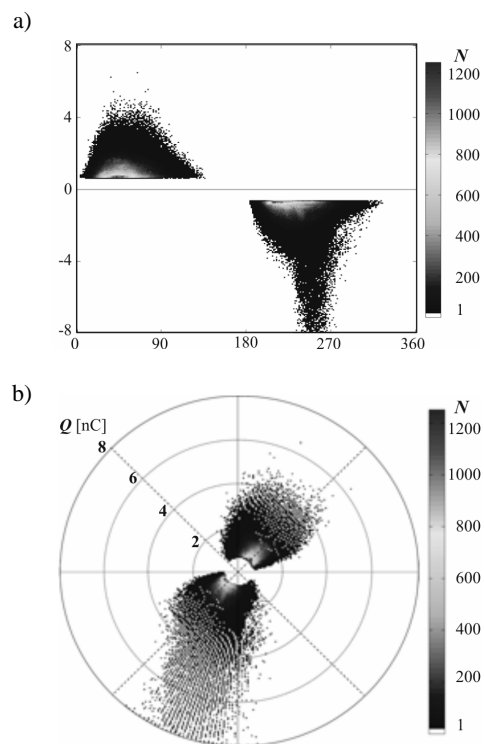
Dla dokonania rejestracji niezbędny jest sygnał impulsów wyładowań $u(t)$ z obwodu detekcyjnego oraz sygnał synchronizacji $s(t)$ z układu zasilania napięciem

przeziennym. Impulsy napięciowe po wzmacnieniu przez wzmacniacz wejściowy są przetwarzane przez przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC). Sygnał synchronizacji z dzielnika wysokiego napięcia po normalizacji amplitudy przez wzmacniacz toru synchronizacji jest podawany na wejście komparatora przejścia przez zero (COMP), który generuje informację o chwili t_0 - początku okresu napięcia probierczego. Wyjścia przetwornika i układu sterowania (CTRL) sterują zapisem informacji w pamięci systemu (MEM).

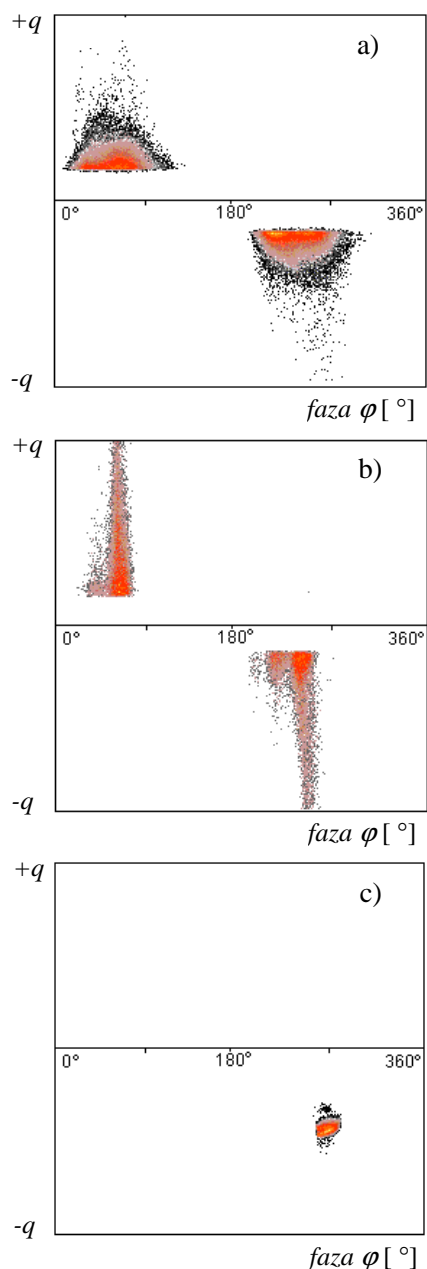
W metodzie obrazów fazowo-rozdzielczych dane dotyczące indywidualnych cech amplitudowo-fazowych pojedynczych impulsów wyładowań niepełnych są agregowane i przedstawiane łącznie w przestrzeni *faza-amplituda-liczba*. Typowy obraz wyładowań niepełnych $n(\varphi, q)$, tworzony jest zgodnie z algorytmem akumulacji impulsów z tego samego obszaru $\Delta\varphi\Delta q$ (rys. 2a). Rozkład ten może być również wizualizowany w układzie współrzędnych biegunowych (rys. 2b). Przykład obu sposobów wizualizacji obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań przedstawiono na rysunku 3. Rysunek 4 zawiera typowe obrazy trzech różnych form wyładowań przedstawione w fazowo-rozdzielczej przestrzeni φ - q - n .



Rys. 2. Tworzenie obrazów fazowo-rozdzielczych w układzie współrzędnych: a) prostokątnych; b) biegunowych



Rys. 3. Obraz $n(\varphi, q)$ wyładowań niepełnych w izolacji pręta maszyny elektrycznej prezentowany w układach współrzędnych (a) prostokątnych i (b) biegunowych

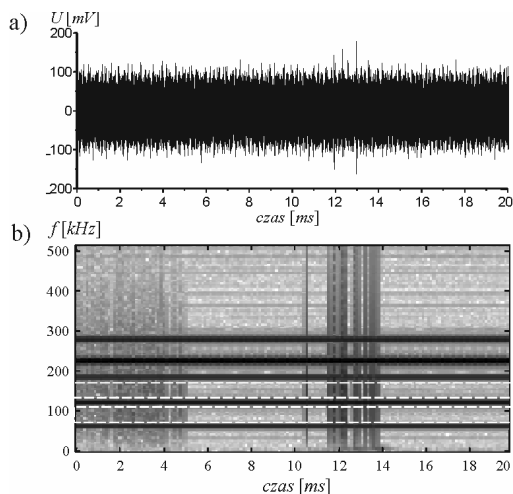


Rys. 4. Przykłady obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań: a) w polu jednostajnym (inkluzyje gazowe wewnątrz izolacji), b) na powierzchniach granicznych, c) w polu wybitnie niejednostajnym

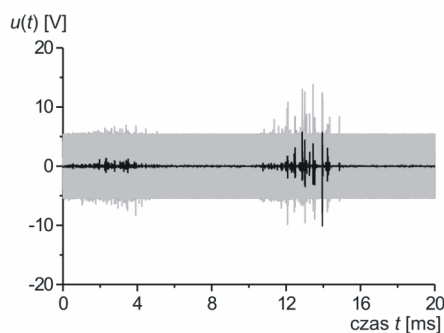
Stosowane od pewnego czasu metody czasowo-częstotliwościowe umożliwiają nie tylko obserwację zmian poziomu sygnałów wyładowań w okresie napięcia probierczego, ale również określenie towarzyszących im zakłóceń (rys. 5). W tym celu stosowane są np. procedury krótkoczasowego przekształcenia Fouriera (*STFT*) lub przekształcenia falkowego [59]. W wielu przypadkach, w szczególności podczas pomiarów na obiektach w miejscu ich zainstalowania, zachodzi potrzeba uzyskania poprawy stosunku sygnał/szum. Na etapie detekcji i akwizycji danych następuje wówczas kondycjonowanie sygnałów pomiarowych oraz ich wstępne przetworzenie w układach przetwarzania analogowego (*ASP*) i cyfrowego (*DSP*) dla eliminacji lub obniżenia poziomu szumów i zakłóceń.

Na rysunku 6 przedstawiono wynik zastosowania filtracji falkowej sygnału wyładowań niepełnych, użytej jako bank selektywnych filtrów dla usunięcia zakłóceń

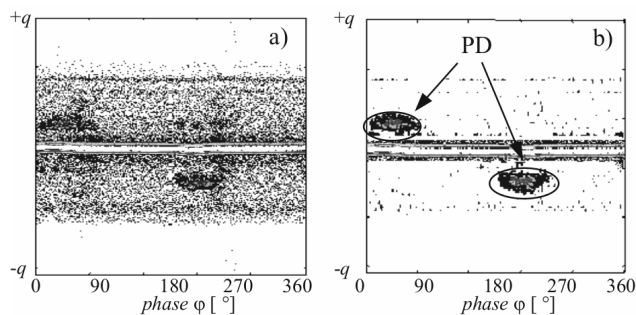
pasmowych, wysokoczęstotliwościowych. Metody odszumiania falkowego zostały również zastosowane w celu poprawy jakości obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań (rys. 7) [32].



Rys. 5. Przykład analizy czasowo-częstotliwościowej wyładowań niepełnych: a) sygnał wyładowań z zakłóceniami, b) spektrogram *STFT*



Rys. 6. Rezultat filtracji falkowej sygnałów wyładowań niepełnych – sygnały przed i po filtracji



Rys. 7. Rejestrowane *on-line* obrazy wyładowań w izolacji silnika 6kV/200kW: a) oryginał, b) po operacji odszumiania falkowego

Dostępne obecnie układy i narzędzia przetwarzania sygnałów, zarówno sprzętowe (np. procesory sygnałowe lub układy typu *mixed-signal*), jak i programowe, umożliwiają skuteczną poprawę warunków wykonywania rejestracji i analiz wyładowań niepełnych oraz tworzenie systemów wspomaganie podejmowania decyzji diagnostycznych.

3. PRACE W DZIEDZINIE KOORDYNACJI IZOLACJI

Zjawiska fizyczne zachodzące w układach elektroenergetycznych i związane z nimi zmiany stanu energetycznego, są przyczyną przebiegów prądów i napięć o charakterze przejściowym, w postaci przetężeń prądowych oraz przepięć.

Niezawodność przesyłu i rozdziału energii elektrycznej jest ściśle związana z rozwojem metod koordynacji izolacji. Ogólne pojęcie koordynacji, oznaczające uporządkowane współdziałanie, zharmonizowanie, uzgodnienie wzajemnego działania – w odniesieniu do koordynacji izolacji układów elektroenergetycznych dotyczy czynników wynikających z ich eksploatacji, które stanowią narażenia napięciowe układu izolacyjnego, jego wytrzymałość elektryczną oraz stosowane środki i sposoby ochrony przed przepięciami.

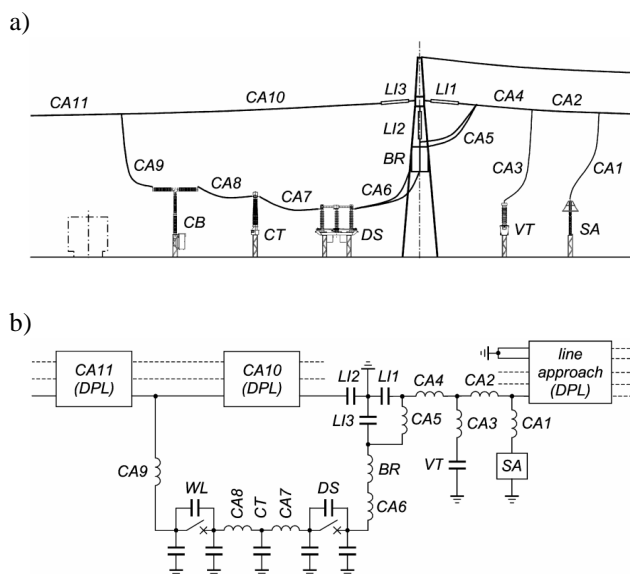
Koordynacja izolacji jest działaniem decyzyjnym, w którym stosując koncepcyjne uporządkowanie zbioru informacji, uzyskuje się optymalną pod względem technicznym oraz ekonomicznym niezawodność przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Zasadniczy wpływ na dokonujący się w tej dziedzinie postęp, posiada rozwój możliwości identyfikacji spodziewanych narażeń przepięciowych, oddziałujących na układ izolacyjny w trakcie jego eksploatacji. Z tego powodu – szczególnie w zakresie przepięć atmosferycznych – intensywnie rozwijane są obecnie metody teoretyczne analizy przepięć, wykorzystujące modele matematyczne zjawisk, w których zastosowanie znajduje komputerowa technika obliczeniowa.

Modelowanie i analiza przepięć atmosferycznych w układach elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć dotyczy specyficznych stanów nieustalonych wywołanych uderzeniami pioruna (np. [23, 43, 44, 45]). Ze względu na szybkozmienny – w stosunku do napięć i prądów o częstotliwości sieciowej – charakter przebiegu prądu pioruna i możliwe do wystąpienia jego wartości, o powstających przepięciach atmosferycznych decydują złożone efekty falowe oraz nieliniowe. Tym samym, modele matematyczne elementów i układów elektroenergetycznych charakteryzują się zdecydowanie większą złożonością, niż modele stosowane na przykład w analizie przepięć wewnętrznych czy stanów ustalonych. Należy również zwrócić uwagę na zależności parametrów modelu od częstotliwości rozważanych przebiegów.

Modelowanie matematyczne narażeń przepięciowych pochodzenia atmosferycznego wspomaga proces koordynacji izolacji układów elektroenergetycznych wysokich i najwyższych napięć, którego nadrzędnym celem jest zapewnienie niezawodnej eksploatacji przy minimalnej wielkości kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych.

Modele matematyczne układów elektroenergetycznych w warunkach oddziaływania przepięć atmosferycznych implementowane są w pakiecie symulacyjnym *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) w wersji ATP (rys. 8). Stanowi on obecnie w świecie podstawowe narzędzie analizy stanów dynamicznych układów elektroenergetycznych. Aplikacje własnych specjalistycznych programów (np. [23, 43, 47, 48]), stanowiących swego rodzaju „obudowę” pakietu EMTP-ATP, pozwala uzyskać wspomaganie komputerowe modelowania

matematycznego badanych układów, symulacji przebiegów przepięciowych oraz oceny narażeń przepięciowych.



Rys. 8. Fragment pola liniowego rozdzielni wysokich napięć (a) i odpowiadający mu model programu EMTP-ATP (b) [45]

4. PROBLEMATYKA PRZEPIĘCIOWA I OCHRONA ODGROMOWA

Wzrastające wymagania odnośnie do niezawodności pracy urządzeń w elektroenergetyce spowodowały dynamiczny rozwój ochrony przepięciowej. Doskonalone są dotychczasowe metody ochrony przepięciowej, a jednocześnie są wprowadzane metody nowe. Zasadniczy postęp, jaki dokonał się w tej dziedzinie w ostatnich latach, wynika z opracowania ograniczników przepięć nowej generacji, stosowanych na wszystkich poziomach napięć nominalnych. Są to ograniczniki beziskiernikowe z tlenków metali. Ogranicznikami takimi są systematycznie zastępowane ograniczniki iskiernikowe zawierające warystory z szeregowymi iskiernikami. O szerokim stosowaniu ograniczników beziskiernikowych zadecydowała głównie duża skuteczność ochrony oraz niezawodność ich działania. Zastosowanie ograniczników o odmiennej budowie i działaniu wiąże się ze zmianą narażeń przepięciowych chronionych układów izolacyjnych. Prowadzone są analizy tych zmian. Podstawą analiz są symulacje komputerowe przepięć w sieciach elektrycznych z ogranicznikami przepięć, prowadzone przy wykorzystaniu modeli matematycznych urządzeń elektrycznych.

Podstawowy problem w zakresie modelowania beziskiernikowych ograniczników przepięć stanowi uwzględnienie złożonych zjawisk fizycznych w warystorach z tlenków metali, decydujących o przewodzeniu prądu. W wyniku badań prowadzonych w tej dziedzinie w Katedrze Elektroenergetyki opracowano metody doboru parametrów elementów wybranych istniejących modeli matematycznych ograniczników, umożliwiające rozszerzenie zakresu stosowania modeli. Konsekwencją tych prac są modele, które mogą być używane do wykonywania symulacji numerycznych

przepięć w urządzeniach i układach chronionych ogranicznikami beziskiernikowymi o dowolnych parametrach [39, 40].

Dziedziną ściśle związaną z ochroną przepięciową jest ochrona odgromowa. Konieczność doskonalenia metod i środków ochrony odgromowej [2,41] wynika z konieczności zapewnienia skutecznej ochrony przepięciowej aparatury elektronicznej wrażliwej na zakłócenia pochodzenia piorunowego. Jednocześnie urządzenia elektroniczne są stosowane coraz szerzej w wielu dziedzinach gospodarki a ich koszt jednostkowy jest zwykle wysoki. Ochrona ta oprócz działania osłonowego obejmuje także między innymi ekranowanie od piorunowych impulsów elektromagnetycznych. Obok ryzyka trafienia pioruna bezpośrednio w obiekt, uwzględnia się możliwość uderzenia w linie zasilające i linie przesyłu sygnałów. Złożoność zjawisk związanych z wyładowaniami piorunowymi wymusza konieczność stosowania metod probabilistycznych. Wynikiem prac prowadzonych w tej dziedzinie w Katedrze Elektroenergetyki są między innymi wielostanowe modele niezawodności [50], doskonalone są także modele ochrony zewnętrznej prowadzące do uzgodnienia różnych metod rozmieszczania zwodów opieranych dotychczas na odmiennych przesłankach teoretycznych. Współczesna ochrona odgromowa obiektów elektroenergetycznych, teletechnicznych jest realizowana za pomocą zwodów wysokich lub sieci zwodów niskich. Zwody wysokie projektowane są w oparciu o klasyczną metodę „kąta ochronnego” lub nowoczesną „toczącej się kuli”, natomiast w przypadku zwodów niskich stosuje się metodę „klatkową” – wynikającą z tradycji, lecz nie popartą badaniami ani przekonującymi przesłankami teoretycznymi. Podejmowane są badania modyfikujące „teorię elektrogeometryczną” w celu rozszerzenia zakresu zastosowań procedury „toczącej się kuli” na sieć zwodów niskich [51, 52, 53, 54].

5. ANALIZA NARAŻEŃ PRZEPIĘCIOWYCH UKŁADÓW IZOLACYJNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

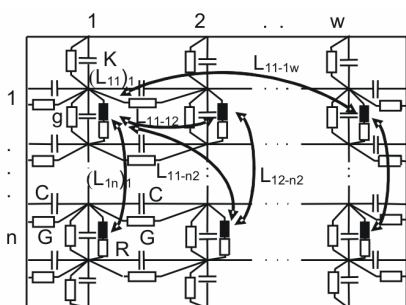
Skuteczna ochrona przepięciowa urządzeń elektrycznych jest jedną z metod stosowanych w celu zapewnienia niezawodności przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Obecnie, ze względu na wymagania prawa energetycznego, na przedsięwzięcia techniczne w sieciach elektrycznych, umożliwiające zwiększenie niezawodności zasilania odbiorców energii elektrycznej, jest zwrócona szczególna uwaga. Prowadzone są analizy propagacji przepięć w sieciach elektrycznych wysokich napięć w celu oceny efektów działania beziskiernikowych ograniczników przepięć, stosowanych coraz częściej do ochrony bezpośredniej urządzeń od przepięć zamiast odgromników zaworowych. Szczególnie wnikliwa jest analiza narażeń układów izolacyjnych transformatorów, są to bowiem urządzenia decydujące o niezawodności zasilania wielu odbiorców energii elektrycznej i ich koszt jednostkowy jest wysoki. Również zastosowanie nowoczesnych ograniczników przepięć do ochrony transformatorów wiąże się ze zmianami narażeń przepięciowych układów izolacyjnych.

Prace naukowe prowadzone w tej dziedzinie w Katedrze Elektroenergetyki obejmują analizy narażeń

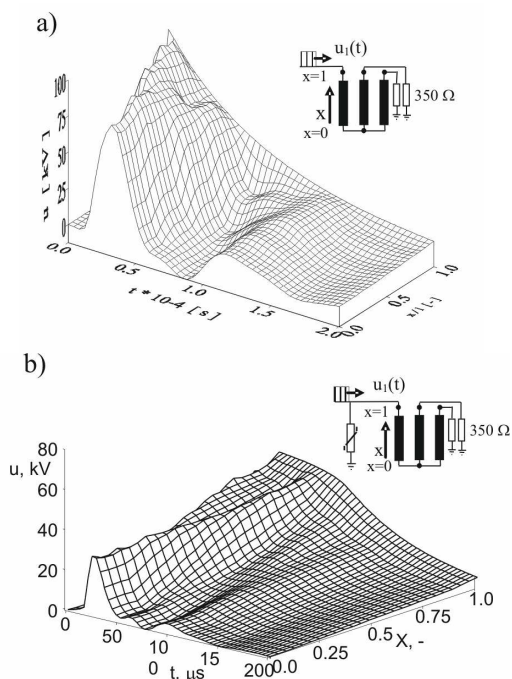
przebiegów układów izolacyjnych wewnętrznych transformatorów energetycznych [39]. Podstawą analiz są wyniki badań oraz symulacji komputerowych. Prace teoretyczne obejmują przede wszystkim:

- doskonalenie modeli matematycznych uzwojeń,
- analizy narażeń układów izolacyjnych wewnętrznych transformatorów od przepięć.

Prace w zakresie modelowania koncentrują się głównie na doskonaleniu modelu matematycznego transformatorów używanego do obliczeń przepięć wewnętrznych, którego podstawą jest schemat ze stałymi skupionymi uzwojeń (rys. 9) [39]. Dotyczy ono głównie metod wyznaczania parametrów schematu z uwzględnieniem wpływu rdzenia ferromagnetycznego na indukcyjności uzwojeń, zależności częstotliwościowych rezystancji uzwojeń, konduktywność izolacji oraz pojemności transformatorów.



Rys. 9. Schemat zastępczy uzwojeń transformatora z elementami o stałych skupionych



Rys. 10. Rozkłady napięć narażających układ izolacyjny doziemny uzwojeń wysokiego napięcia transformatora rozdzielczego: a) rozkład napięć wewnętrznych podczas prób udarem piorunowym, b) rozkład napięć w transformatorze chronionym ogranicznikami beziskiernikowymi

Wyniki badań, prowadzonych w zakresie modelowania cyfrowego transformatorów są wykorzystywane w symulacjach numerycznych przepięć generowanych

wewnątrz transformatorów (rys. 10). Stanowią one podstawę oceny skuteczności działania nowoczesnej ochrony przepięciowej oraz optymalizacji układów izolacyjnych transformatorów energetycznych.

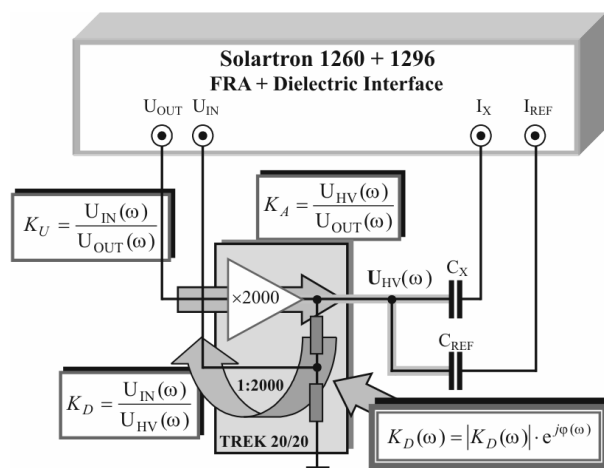
6. METODY SPECJALNE W DIAGNOSTYCE UKŁADÓW IZOLACYJNYCH

Celem spektroskopii impedancyjnej jest określenie szerokopasmowej funkcji przejścia badanego obiektu, a podstawowymi wielkościami pomiarowymi są zależne częstotliwościowo: impedancja $Z(\omega)$ lub admitancja $Y(\omega)$. Dla wyznaczenia tych wielkości mogą być stosowane różnego rodzaju pobudzenia szerokopasmowe - impulsowe lub sinusoidalne. Wymieniona metoda spektroskopowa jest stosowana w badaniach:

- szerokopasmowej odpowiedzi dielektrycznej układów izolacyjnych [21, 30];
- odkształceń uzwojeń maszyn elektrycznych;

Urządzeniami służącymi tym badaniom są analizatory odpowiedzi częstotliwościowej *FRA* (*Frequency Response Analyser*). Rozwiązania konstrukcyjne tego typu przyrządów są oparte na układzie korelatora, w którym prąd płynący przez badany układ jest korelowany względem dwóch synchronicznych, ortogonalnych sygnałów odniesienia $\sin \alpha t$ i $\cos \alpha t$, z których jeden odpowiada bezpośrednio sygnałowi pobudzenia. Układ taki działa jak filtr składowej podstawowej, w którym selektywność jest zależna od całkowitego czasu analizy sygnałów, stanowiącego wielokrotność okresu częstotliwości podstawowej.

Metodę cechuje duża dokładność i możliwość uzyskania dużych wartości współczynnika sygnał/ szum, jednak efektem sekwencyjnego skanowania widma częstotliwości są długie czasy pomiaru. Dotyczy to w szczególności zakresu bardzo niskich częstotliwości.

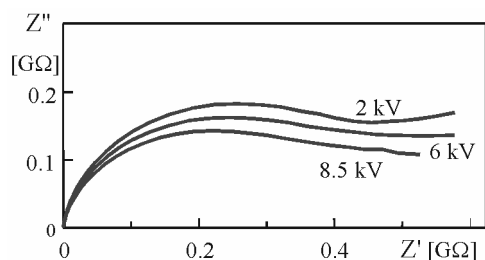


Rys. 11. Konfiguracja stanowiska pomiarowego wysokonapięciowej spektroskopii impedancyjnej

W Laboratorium Wysokich Napięć Katedry Elektroenergetyki AGH utworzono stanowisko wysokonapięciowej spektroskopii impedancyjnej, przeznaczone dla prowadzenia badań układów izolacyjnych przy pobudzeniach napięciem przemiennym o wartości szczytowej do 20 kV. Elementami składowymi tego stanowiska są (rys. 11):

- analizator typu FRA Solartron 1260A,
- przystawka dielektryczna Solartron 1296A,
- wzmacniacz wysokonapięciowy TREK20/20B.

Możliwości pomiarowe opisywanego stanowiska w zakresie wysokonapięciowej spektroskopii impedancyjnej pozwalają na wykonywanie badań dielektrycznych efektów nieliniowych, wywołanych wpływem silnych pól elektrycznych. Na rysunku 12 przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów ilustrujące wpływ napięcia probierczego na wartości zespolonej impedancji kabla średniego napięcia z izolacją papierowo-olejową.



Rys. 12. Wybrane wyniki pomiarów impedancyjnych kabla średniego napięcia z izolacją papierowo-olejową ($f=0,01\div 100\text{Hz}$)

7. ZAGADNIENIA DIAGNOSTYKI TRANSFORMATORÓW

Prace naukowe prowadzone w zakresie diagnostyki transformatorów dotyczą wykrywania zniekształceń i uszkodzeń uzwojeń. Doskonalona jest metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej, której podstawą są wyniki rejestracji a także symulacje komputerowe funkcji przenoszenia definiowane następującymi zależnościami [35]:

$$Y(f) = \frac{I_z(f)}{U_z(f)} \quad (1)$$

$$TF_i(f) = \frac{I_{wy}(f)}{U_z(f)} \quad (2)$$

$$TF_u(f) = \frac{U_{wy}(f)}{U_z(f)} \quad (3)$$

gdzie: U_z, U_{wy} – napięcie zasilania i napięcie wyjściowe, I_z, I_{wy} – prąd w uzwojeniu zasilanym i prąd wyjściowy transformatora.

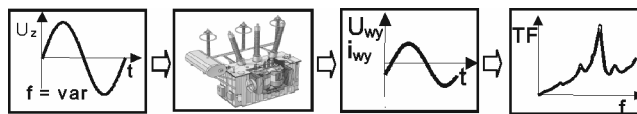
W przypadku, gdy prąd oraz napięcie odnoszą się do tego samego uzwojenia, funkcja przenoszenia uzwojenia reprezentuje jego admitancję.

Prace dotyczące wykrywania uszkodzeń uzwojeń metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej koncentrują się na następujących zagadnieniach:

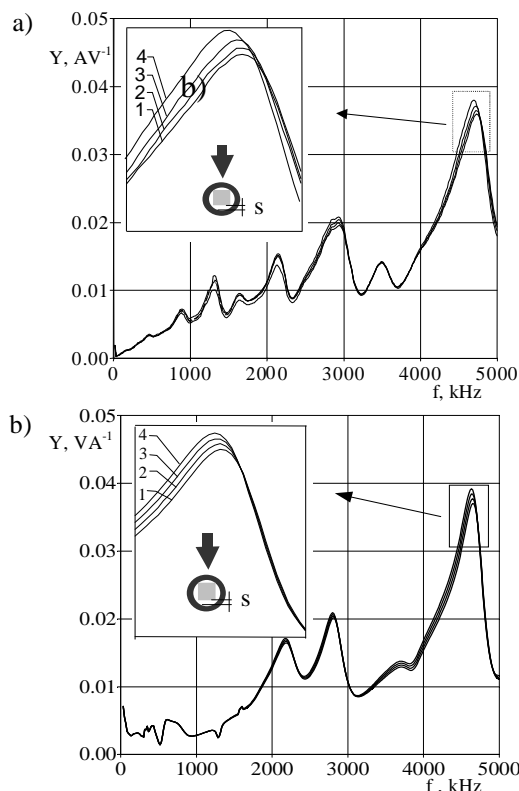
- badania uszkodzeń uzwojeń transformatorów;
- symulacje numeryczne funkcji przenoszenia uzwojeń;
- doskonalenie kryterium wykrywania uszkodzeń uzwojeń [36, 37, 38].

Badania uzwojeń polegają na wyznaczeniu funkcji przenoszenia dla dyskretnych wartości częstotliwości (rys. 13). Metoda umożliwia identyfikację niewielkich uszkodzeń uzwojeń (rys. 14a). Symulacje numeryczne admitancji uzwojeń (rys. 14b) potwierdzają, że do wyznaczania zależności częstotliwościowych admitancji transformatorów może być stosowany model cyfrowy ze stałymi skupionymi uzwojeń, używany do symulacji numerycznych przebiegów wewnętrznych w transformatorach. Wyniki prowadzonych

badania zarówno eksperymentalnych, jak i teoretycznych są podstawą prac w zakresie doskonalenia kryteriów oceny charakteru i zakresu uszkodzeń uzwojeń badanych metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej.



Rys. 13. Schemat blokowy wyznaczania funkcji przenoszenia transformatorów



Rys. 14. Zależności częstotliwościowe admitancji uzwojenia transformatora przemieszczanego do kolumny rdzenia: a) wyniki pomiarów, b) wyniki obliczeń; 1) $s = 0,6$ cm (położenie wyjściowe), 2) $s = 0,4$ cm, 3) $s = 0,2$ cm, 4) $s = 0$ cm

8. IDENTYFIKACJA STANU PÓŁ ELEKTROMAGNETYCZNYCH W OTOCZENIU OBIEKTÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH

Znajomość stanu elektromagnetycznego przestrzeni – szczególnie pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości sieciowej – w otoczeniu wysokonapięciowych układów przesyłowo-rozdzielczych jest niezbędna dla analizy i oceny skutków ich oddziaływań, a jego identyfikacja może być przeprowadzana metodami pomiarowymi [24, 25] lub obliczeniowymi [17, 18, 19, 46]. Do pomiarów natężenia pola elektrycznego, zaprojektowano i skonstruowano w Katedrze Elektroenergetyki AGH mierniki dipolowe sferyczne typu MNPE-1. Do skalowania mierników skonstruowany został również zgodnie z wymaganiami normy PN-IEC 833:1997, wzorzec pola elektrycznego w postaci kondensatora płaskiego (rys. 15). Wzorzec oddany został do dyspozycji Głównego Urzędu

Miar i w 1998 roku uczestniczył w ogólnoeuropejskich badaniach komparacyjnych [1].



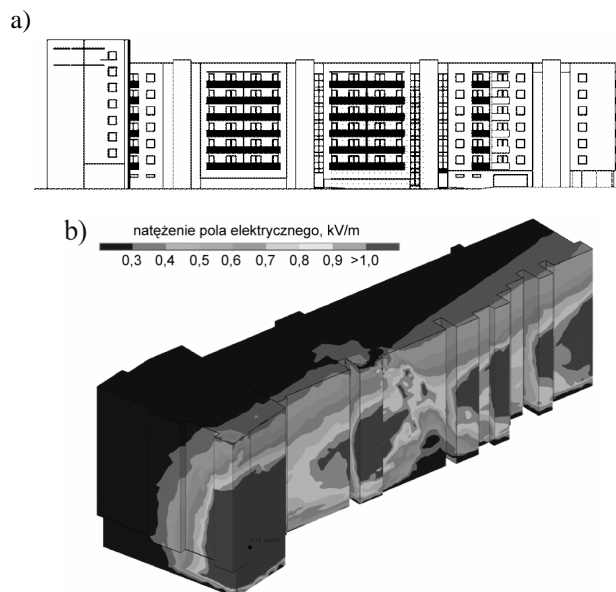
Rys. 15. Wzorzec pola elektrycznego 50Hz w Katedrze Elektroenergetyki AGH (wg normy PN-IEC 833:1997)

Obecnie coraz częściej wyznaczanie rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego realizowane jest w oparciu o metody numeryczne i odpowiednie programy komputerowe [17, 18, 19, 46]. Metody te, polegające na aproksymacji rozwiązania równania Laplace'a bądź Poissona w oparciu o metodę residuów ważonych lub wariacyjną, umożliwiają dzięki rozwojowi techniki informatycznej identyfikację pola elektrycznego w przestrzeni trójwymiarowej dla układów o znacznym stopniu komplikacji. Możliwe przy tym staje się przyjęcie mniejszej liczby założeń upraszczających co do np.: zwisu przewodów w przęśle, wpływu słupów, profilu powierzchni ziemi, obecności człowieka, budynków itp.

Zastosowanie metody elementów skończonych (MES) pozwala efektywnie uwzględniać warunki brzegowe, niejednorodność, anizotropię i nieliniowość parametrów środowiskowych rozważanego obszaru. Kluczowym zagadnieniem w MES jest właściwe przygotowanie geometrii analizowanego układu i podział tego obszaru na odpowiednie elementy. W większości przypadków analiza dotyczy konkretnych konfiguracji (np. linia elektroenergetyczna, budynek, profil terenu), konieczne jest zatem przygotowanie trójwymiarowego modelu geometrycznego obszaru z uwzględnieniem geometrii linii, słupów, budynków oraz rzeźby terenu.

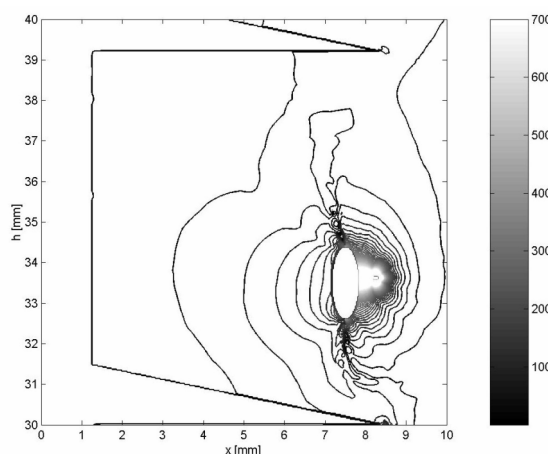
Lokalizacja obiektów budowlanych w otoczeniu urządzeń elektroenergetycznych jest jednym z przykładów możliwości aplikacji systemów CAD do modelowania geometrii, pakietów MES do obliczeń i wizualizacji wyników [18 46]. Najczęściej zagadnienia tego typu dotyczą lokalizacji budynków w sąsiedztwie linii wysokich napięć.

W analizie, której przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 16, zastosowano model trójwymiarowy, uwzględniający między innymi skomplikowaną rzeźbę terenu oraz konstrukcje wsporcze linii 110 kV. Model budynku uwzględniał lokalizację balkonów oraz zmienne wysokości bryły głównego budynku i jego wyższej części południowej.



Rys. 16. Obiekt budowlany projektowany w pobliżu linii 110 kV: a) elewacja budynku, b) rozkład pola elektrycznego na elewacji budynku

Znajomość obrazów pola elektrycznego niezbędna jest także do oceny potencjalnych skutków jego oddziaływania w warunkach prac pod napięciem (PPN) [17, 19]. W metodzie pracy na potencjale następuje zbliżenie się pracownika do przewodu fazowego, a następnie bezpośrednie zetknięcie z tym przewodem podczas wykonywania czynności remontowych. Modelowanie rozkładu pola elektrycznego w PPN ma na celu wyznaczenie obszarów, w których zostaje ono zdeformowane w wyniku na przykład transportu pracownika z powierzchni ziemi w otoczenie przewodu fazowego (rys. 17).



Rys. 17. Pole elektryczne podczas PPN – izolinie co 20 kV/m

Do zespołu problemów dotyczących narażeń elektrycznych w elektroenergetycznych liniach przesyłowych wysokich napięć należy również oddziaływanie pola elektrycznego na trakty światłowodowe prowadzone wzdłuż tych linii. Jest to problem lokalizacji tych kabli w przęśle linii napowietrznej ze względu na dopuszczalne wartości pola elektrycznego na ich powierzchni [20] oraz możliwe procesy degradacji

powłok w warunkach rzeczywistych narażeń eksploatacyjnych [8].

9. ZAKOŃCZENIE

Współczesna technika wysokich napięć obejmuje niezwykle szeroki zakres zagadnień, od podstawowych problemów fizykalnych w dziedzinie pól elektromagnetycznych zarówno w mikroskali wyładowań elektrycznych w materiałach, do najstarszej, znanej ludzkości formy wyładowań atmosferycznych, fascynujących nadal swoją złożonością. W innym spojrzeniu technika wysokich napięć stanowi z jednej strony podstawę budowy urządzeń w systemie przesyłowym i rozdzielczym, z drugiej zaś determinuje prawidłową ich eksploatację w warunkach złożonych narażeń zewnętrznych i wewnętrznych. Zespół Katedry Elektroenergetyki AGH starał się w swej historii wnieść wkład do tak rozumianego profilu techniki wysokich napięć.

Należy z szacunkiem podkreślić niezwykle cenną i wzajemnie życzliwą współpracę, jaką w tej działalności utrzymywano z zespołami w innych jednostkach uczelnianych w kraju.

10. BIBLIOGRAFIA

1. EUROMET Comparison of AC Electric Field Strength EUROMET.EM-S6. Final report by H. Eckardt, R. Lippoldt, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Berlin, Nov. 2002
2. Flisowski Z., Mazzetti C, Włodek R., A Procedure to Ensure Optimally Effective Lightning Protection of Structures, Proc. of the 26th Int. Conf. on Lightning Protection, vol. 2.,2002, Cracow, pp. 827-832
3. Florkowska B., Badania wyładowań częściowych w izolacji papierowo-olejowej kabli elektroenergetycznych metoda analizy impulsów napięciowych, Rozprawa doktorska, AGH, 1968
4. Florkowska B., Analiza wielokanałowa wyładowań niepełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia, Przegląd Elektrotechniczny, z.11-12, 1983, 460-465
5. Florkowska B., Analiza mechanizmów wyładowań niepełnych w układach elektroizolacyjnych wysokiego napięcia, UWND AGH, 1995, ISSN 0867-6631
6. Florkowska B., Wyładowania niepełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia analiza mechanizmów, form i obrazów, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 1997
7. Florkowska B., Wytrzymałość elektryczna gazowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia, UWND AGH, 2004, ISBN 83-89388-01-4
8. Florkowska B., Florkowski M., Timler M., Phase-resolved patterns of dry-band arcing on fiber-optic ADSS cable, 10th Int Electrical Insulation Conference INSUCON 2006, Birmingham UK , May 2006
9. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R. Micro-processor System for Digital Registration of Partial Discharges, XII Symp. on Electrical Discharges in Gases, Warszawa, 1989
10. Florkowska B., Florkowski M., Włodek R., Zydrón P., Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2001
11. Florkowska B., Florkowski M., Zydrón P., Localisation and identification of corona forms based on phased - resolved images, Meas. Science and Technology, IoP Publishing, No 12, 2001, 1304-1310
12. Florkowska B., Florkowski M., Zydrón P., Application of Corona Images to Localisation and Identification of Defects in HV Overhead Lines and Substation Equipment, 12th Int. Symp. on High Voltage Engineering, ISH'01, Bangalore, India, 2001
13. Florkowska B., Florkowski M., Zydrón P., New metod for identification of corona discharges, Archives of Electrical Engineering, Vol. L, No.3, 2001, 313-323
14. Florkowska B., Florkowski M., Zydrón P., Influence of testing voltage frequency on partial discharge phase-resolved images, 13th Int.Symp. on High Voltage Engineering, ISH'03, Delft, Holland, 2003
15. Florkowska B., Florkowski M., Zydrón P., Analysis of PD phase-resolved images at low frequency of testing voltage, IEEE Symp. on Electrical Insulation, Indianapolis, USA, ISEI 2004, 143-146
16. Florkowska B., Florkowski M., Zydrón P., The Role of Harmonic Components on Partial Discharge Mechanism and Degradation Processes in Epoxy Resin Insulation, IEEE Int.Conf.on Solid Dielectrics, ICSD'07, 2007
17. Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Modelowanie narażeń od pól elektrycznych i magnetycznych w warunkach prac pod napięciem, Energetyka, Zeszyt Tematyczny 1/03, str. 27-29
18. Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Nowak W., Timler M., Komputerowa analiza pola elektrycznego o częstotliwości 50 Hz w otoczeniu napowietrznych linii elektroenergetycznych. Energetyka, 2006, Zeszyt Tematyczny nr VIII, str. 170-174
19. B. Florkowska, Jackowicz-Korczyński A, Nowak W., Timler M., Modelowanie pól elektrycznych w warunkach prac pod napięciem, Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje, 2006
20. Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Timler M., Analysis of electric field distribution around the high voltage transmission lines with an ADSS fiber optic cable, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.19, no. 3, p.1183-1189, 2004
21. Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Włodek R., Zydrón P., Investigation of HV insulation properties - selected time and frequency domain methods, IEEE CEIDP 2003 Annual Report, pp. 498-501, Albuquerque, New Mexico, USA, 2003
22. Florkowska B., Moskwa S., Nowak W., Włodek R., Zydrón P., Modelowanie procedur diagnostycznych w eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia, UWND AGH, 2006, ISBN 83-7464-081-2
23. Florkowska B., Nowak W., Tarko R., Modelling of the corona for the analysis of the overvoltage waves propagation in the overhead high voltage transmission lines, Archives of Electrical Engineering, vol. LVI, no. 215-1/2006, pp. 47-62

24. Florkowska B., Nowak W., Tarko R., Żurek F., Badania pól elektrycznych i magnetycznych o częstotliwości sieciowej w aspekcie oceny warunków eksploatacyjnych rozdzielni 110 kV, *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, 1/05, str. 90-93
25. Florkowska B., Nowak W., Tarko R., Żurek F., Analiza pola elektromagnetycznego o częstotliwości 50 Hz w rozdzielniach 110 kV dla oceny narażeń w środowisku pracy. *Energetyka, Zeszyt Tematyczny nr VIII*, 2006, str. 174-178
26. Florkowska B., Włodek R., Einfluss der teilentladungen auf die Oilimpriegnierte Papierisolation von Hochspannungskabeln, *XIII Int. Wiss. Kol. TH Ilmenu*, 1968
27. Florkowska B., Włodek R., Pulse height analysis of partial discharges in air, *IEEE Trans. El. Insul*, 6, pp. 932-940, 1993
28. Florkowska B., Włodek R., Analysis of Partial Discharge in Air using Phase-resolved Patterns, *Conf. Electrical Insul. and Diel. Phenomena, CEIDP'96, California*, paper 7A-11
29. Florkowska B., Zydrón P., Interpretation of Partial Discharge Patterns for Insulation Diagnostic Aims, *10th Int. Symp. on High Voltage Engineering, ISH'97, Montreal, Canada*, 1997
30. Florkowska B., Zydrón P., Wysokonapięciowa spektroskopia impedancyjna w badaniach układów izolacyjnych wysokiego napięcia, *Przegląd Elektrotechniczny Konferencje*, nr 1/04, str. 65-68, Warszawa, 2004
31. Florkowski M., Partial discharge image recognition using neural network for high voltage insulation systems, *Rozprawy i Monografie nr 45, AGH, Kraków*, 1996
32. Florkowski M., Wavelet based PD image denoising, *Proc. 11th ISH*, paper 5.21, London, 1999
33. Florkowski M., Florkowska B., Wavelet-based partial discharge image denoising, *IET Generation Transmission, Distribution, Vol.1, No 2, 2007*, 340-347
34. Florkowski M., Florkowska B., Distortion of partial discharge images caused by high voltage harmonics, *IEE Generation, Transmission and Distribution, Vol.152, No 2, 2006*, 171-180
35. Florkowski M., Furgał J., Experimental and theoretical determination of transfer function of transformer windings. *Arch. of Electr. Eng., Warsaw, Vol. L. II, No 2, 2003*, str. 137-152
36. Florkowski M., Furgał J., Detection of transformer windings deformations based on the transfer function - Measurements and simulations, *Meas. Scien. and Technol.*, No 14, 2003, pp. 1986-1992
37. Florkowski M., Furgał J., High frequency method for determining winding faults in transformers and electrical machines. *Rev. of Scient. Instr.*, 2005, 76, pp. 114701-114707
38. Florkowski M., Furgał J., The detection of winding faults of electrical machines using the frequency response analysis method, *Meas. Science and Technol.*, 2004, No 15, pp. 2067-2074
39. Furgał J., Analiza narażeń przepięciowych izolacji transformatora chronionego iskiernikowymi i bez-iskiernikowymi ogranicznikami przepięć, *Seria: Rozprawy i Monografie nr 118, UWND AGH*, 2003
40. Furgał J., Analiza wybranych narażeń przepięciowych układów izolacyjnych transformatorów, *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, nr 1/05, str. 108-111
41. Łoboda M., Flisowski Z., Włodek R., Mazzetti C., Problems of LPS Standardization for Structures and Plants Endangered by Fire and Explosion. *Proc. of 25th Int. Conf. on Lightning Protection*, vol. 2, Rhodes, 2000, pp. 898-903
42. Moskwa Sz., Optymalizacja w diagnostyce urządzeń elektroenergetycznych wysokiego napięcia, *Rozprawa doktorska, AGH, Kraków*, 2006
43. Nowak W., Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych. *Seria: Rozprawy i Monografie nr 139, Kraków, UWND AGH*, 2005
44. Nowak W., The analysis of backflashovers in high voltage overhead lines, *Archives of Electrical Engineering*, vol. LIV, no 213-3/2005, pp. 321-341
45. Nowak W., Numerical modelling of lightning surges in high voltage substations, *Archives of Electrical Engineering*, vol. LVI, no 215-1/2006, pp. 31-45
46. Nowak W., Jackowicz-Korczyński A., Florkowska B., Komputerowa identyfikacja pól elektrycznych o częstotliwości sieciowej w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych. *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje*, 1/05, str. 176-179
47. Nowak W., Tarko R., Ocena poziomu przepięć atmosferycznych w rozdzielni elektroenergetycznej 110kV. *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje* 01/06
48. Nowak W., Tarko R., Florkowska B., Wpływ ulotu elektrycznego na poziom przepięć atmosferycznych w rozdzielni 110 kV. *Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje* 1/05, str. 180-183
49. Siwik A., Wielokryterialne metodyki wyznaczania wielonarażeniowych modeli życia układów izolacyjnych. *UWND, Seria: Rozprawy i Monografie*, nr 59, AGH, Kraków, 1997
50. Szczerbiński M., Multi-State Reliability Models for Lightning Hazard Assessment. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, vol. 1, no 1, 2004, pp. 1- 12
51. Szczerbiński M., A Discussion of 'Faraday Cage' Lightning Protection and Application to Real Building Structures. *J. of Electrostatics*, vol. 48, No. 2., January 2000, 145-154
52. Szczerbiński M., Numerical Estimation of Lightning Hazard to Humans during Outdoor Activity. *Proc. of 24th Int. Conf. on Lightning Protection*, vol. 2., Birmingham, Staffordshire University, 832-835
53. Szczerbiński M., Lightning Hazards and Risk to Humans: some Case Studies. *Journal of Electrostatics*, vol. 59 (2003), 15-23
54. Szczerbiński M., Lightning protection with the mesh method: Some models for the effectiveness analysis, *Journal of Electrostatics*, vol. 64, Issue 5, May 2006, 283-288
55. Tarko R., Modelowanie ulotu elektrycznego dla analizy warunków eksploatacyjnych wysokonapięciowych układów elektroenergetycznych, *Rozprawa doktorska, AGH*, 2007

56. Włodek R., Analiza wyładowań niezupełnych i jej zastosowanie do ich interpretacji w układach izolacyjnych, UWND AGH, 1974
57. Włodek R., Mechanizmy działania wyładowań niezupełnych w dielektrykach, Wyd. Komitet Elektrotechniki PAN, 1992
58. Włodek R., Florkowska B., Electrical Effects of Partial Discharges in Polimer Dielectric, Joint Conf. Electrical Insulation and Insulating Materials, Nagoya, Japan, 1993, pp. 289-292
59. Zydrón P, Zastosowanie analizy czasowej i częstotliwościowej do badania wyładowań niezupełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków, 2001

**HIGH VOLTAGE ENGINEERING IN ELECTRICAL POWER ENGINEERING DEPARTMENT
AT FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING, AUTOMATICS, COMPUTER SCIENCE AND
ELECTRONICS OF THE AGH – UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

Key words: high voltage engineering, insulating systems, overvoltage, electromagnetic fields, diagnostic

Paper presents the high voltage engineering as the research field being carried on during tens of years in the Department of Electrical Power Engineering of the AGH-University of Science and Technology Krakow. This developed research field comprised larger and larger high voltage problems range, both its theoretical aspects and experimental works carried on in high voltage laboratory being adapted to new tasks. Attached review of research works contains the selected problems being realized by means of the most modern measurement- and computer methods.