

**Barbara FLORKOWSKA, Jakub FURGAŁ, Wiesław NOWAK,
Marek SZCZERBIŃSKI, Romuald WŁODEK, Paweł ZYDRON**
AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA, KATEDRA ELEKTROENERGETYKI

Problemy eksploatacji i niezawodności w elektroenergetyce

Prof. dr hab. inż. Barbara FLORKOWSKA

Absolwentka Wydziału Elektrotechniki AGH, od 2002 r. kierownik Katedry Elektroenergetyki AGH. Zainteresowania naukowe: technika wysokich napięć; diagnostyka układów izolacyjnych; mechanizmy przemian struktur dielektryków w polu elektrycznym, szczególnie mechanizmy wyładowań niepełnych; pola E-M w otoczeniu obiektów elektroenergetyki.



e-mail: beflor@agh.edu.pl

Dr hab. inż. Jakub FURGAŁ

Absolwent Wydziału Elektrotechniki Górniczej i Hutniczej AGH, od 1973 r. pracownik Katedry Elektroenergetyki AGH. Zajmuje się analizą narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych i ochroną przepięciową oraz problemami diagnostyki, szczególnie transformatorów energetycznych.



e-mail: furgal@agh.edu.pl

Dr inż. Wiesław NOWAK

Absolwent Wydziału Elektrotechniki Automatyki i Elektroniki AGH, od 1987 r. pracownik Katedry Elektroenergetyki AGH. Obszary zainteresowań: elektryczne stany przejściowe w układach elektroenergetycznych oraz problemy eksploatacji linii i stacji elektroenergetycznych w aspekcie oddziaływania pól E-M na środowisko.



e-mail: wiesio@agh.edu.pl

Dr inż. Marek SZCZERBIŃSKI

Absolwent Wydziału Elektrotechniki Górniczej i Hutniczej AGH, od 1972 r. pracownik Katedry Elektroenergetyki AGH. Specjalizuje się w zakresie ochrony odgromowej obiektów elektroenergetyki i budowlanych, modelowaniem mechanizmów wyładowań atmosferycznych.



e-mail: masz@agh.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Romuald WŁODEK

Absolwent Wydziału Elektrotechniki AGH, członek Komitetu Elektrotechniki PAN - przewodniczący Sekcji Wielkich Mocy i Wysokich Napięć. Działalność naukowa w dziedzinie techniki wysokich napięć; zajmuje się procesami fizycznymi w układach elektroizolacyjnych w eksploatacji, diagnostyka, techniką kablową, modelowaniem i pomiarami pól E-M, narażeniami przepięciowymi.



e-mail: gewlodek@cyf-kr.edu.pl

Dr inż. Paweł ZYDRON

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH, od 1997 r. pracownik Katedry Elektroenergetyki AGH; wcześniej projektant systemów pomiarowych w IFJ w Krakowie i firmach prywatnych. Obszary zainteresowań: diagnostyka układów izolacyjnych i pomiary wysokonapięciowe z zastosowaniem metod DSP.



e-mail: pzydron@agh.edu.pl

Exploitation and reliability problems in electric power industry

Abstract

Reliability of complex structures, as modern transmission and distribution electric power systems, depends on knowledge of a series interdisciplinary problems; among them especially technical but also economical and ecological issues are important. A condition of proper functioning of an electric power system is the learning of the exploitation hazards as a basis to choose proper ways to counteract or minimize the results. With regard to domestic power industry, it results not only from technical factors but also from the ownership changes. The research activities of Department of Electrical Power Engineering AGH-UST – which concerns on identification of exploitation hazards in high voltage transmission and distribution systems – are presented in the paper. In general, the problems refer to reliability and risk in electric power engineering, resulting from necessity to increase the transmission ability and minimization of energy losses when the nominal voltages are elevated.

Keywords: electrical power engineering, reliability, exploitation hazards, diagnostics, insulating systems.

Streszczenie

Niezawodność złożonych struktur, jakimi są współczesne układy przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, uwarunkowana jest opanowywaniem szeregu problemów o charakterze interdyscyplinarnym, wśród których oprócz zagadnień ściśle technicznych istotne są szczególnie aspekty

ekonomiczne i ekologiczne. Warunkiem prawidłowego funkcjonowania systemu elektroenergetycznego jest rozpoznanie zespołu narażeń eksploatacyjnych, będące podstawą wyboru odpowiednich środków przeciwdziałania lub minimalizacji ich skutków. W odniesieniu do energetyki krajowej dotyczy to nie tylko zagadnień ściśle technicznych, ale związane jest także z dokonującą się restrukturyzacją sektora energetycznego. W artykule przedstawiono kierunki prac naukowo-badawczych w Katedrze Elektroenergetyki AGH w dziedzinie eksploatacji i niezawodności urządzeń w elektroenergetyce, do których między innymi należą: analiza i modelowanie narażeń eksploatacyjnych, problemy ochrony przeciwprzepięciowej, diagnostyka eksploatacyjna urządzeń oraz problemy oddziaływania pól elektromagnetycznych w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych. W ogólnym ujęciu zagadnienia te dotyczą problemów niezawodności i bezpieczeństwa w elektroenergetyce, wynikających z konieczności opanowywania skutków zjawisk związanych ze zwiększaniem zdolności przesyłowych i minimalizacji strat energii przy podwyższaniu napięć znamionowych.

Słowa kluczowe: elektroenergetyka, niezawodność, narażenia eksploatacyjne, diagnostyka, układu izolacyjne.

1. Wstęp

Eksploatacja urządzeń elektroenergetycznych stanowi element pracy systemu elektroenergetycznego i w związku z tym poprzez ich wysoką niezawodność powinna zapewnić ciągłość dostawy energii elektrycznej. Stan techniczny elementów urządzeń jest złożoną funkcją wielu czynników, takich jak: parametry konstrukcyjne, rodzaje materiałów, cykle pracy, przeciążenia, przepięcia,

warunki otoczenia – określone ogólnym mianem narażeń eksploatacyjnych.

Do zespołu zagadnień w dziedzinie eksploatacji i niezawodności urządzeń w elektroenergetyce należą m.in.:

- 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,
- prace w dziedzinie diagnostyki eksploatacyjnej urządzeń, rozpatrywane w aspekcie możliwości rozwoju nowoczesnych metod oceny stanu urządzeń, w tym cyfrowych metod przetwarzania sygnałów, systemów monitoringu – należące do współczesnej strategii eksploatacji urządzeń w elektroenergetyce,
- problemy oddziaływania pól elektromagnetycznych w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych – aspekty techniczne i ekologiczne.

Artykuł zawiera charakterystykę prac w powyższych obszarach realizowanych w Katedrze Elektroenergetyki AGH.

2. Komputerowa analiza układów elektroenergetycznych

Podstawowym warunkiem niezawodnego funkcjonowania systemu elektroenergetycznego jest rozpoznanie zespołu narażeń eksploatacyjnych, będące podstawą wyboru odpowiednich środków przeciwdziałania lub minimalizacji ich skutków. Zjawiska fizyczne zachodzące w układach elektroenergetycznych i związane z nimi zmiany stanu energetycznego, są przyczyną prądów i napięć o charakterze przejściowym, w postaci przetężeń prądowych oraz przepięć.

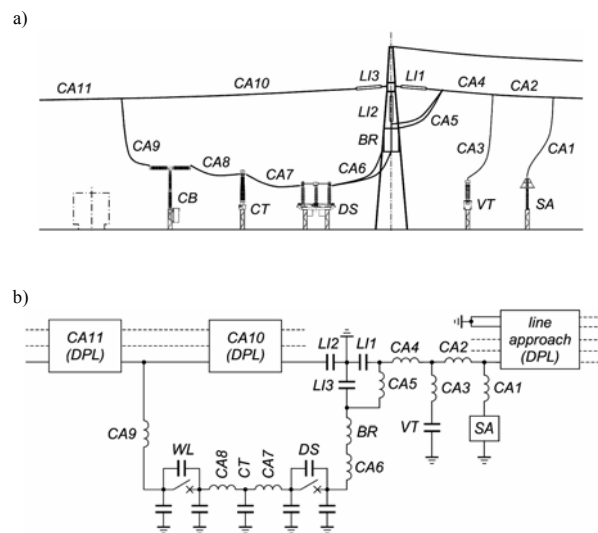
Niezawodność przesyłu i rozdziału energii elektrycznej jest ściśle związana z rozwojem metod koordynacji izolacji. Ogólne pojęcie koordynacji, oznaczające uporządkowane współdziałanie, zharmonizowanie, uzgodnienie wzajemnego działania – w odniesieniu do koordynacji izolacji układów elektroenergetycznych dotyczy czynników wynikających z ich eksploatacji, które stanowią narażenia napięciowe układu izolacyjnego, jego wytrzymałość elektryczna 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 niestabilnych wywołanych uderzeniami pioruna (np. [11, 24, 25, 26]). Ze względu na szybkozmienne – 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 renomowanym pakiecie symulacyjnym *Electromagnetic Transients Program* (EMTP) w wersji ATP (rys. 1). Stanowi on obecnie podstawowe narzędzie analizy stanów dynamicznych układów elektroenergetycznych. Aplikacje własnych specjalistycznych programów (np. [11, 24, 28, 29]), stanowiących swego rodzaju „obudowę” pakietu EMTP-ATP, pozwala uzyskać wspomaganie komputerowe modelowania matematycznego badanych układów, symulacji przebiegów przepięciowych oraz oceny narażeń przepięciowych.



Rys. 1. Fragment pola liniowego rozdzielni wysokich napięć (a) i odpowiadający mu model programu EMTP-ATP (b) [26]

Fig. 1. Part of feeder bay of HV substation (a) and corresponding EMTP-ATP model (b)

3. 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 zdecydowała 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 [22, 23].

Dziedziną ściśle związaną z ochroną przepięciową jest ochrona odgromowa. Potrzeba doskonalenia metod i środków ochrony odgromowej 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 [30], 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 [31, 32, 33, 34].

4. Analiza narażeń przepięciowych układów izolacyjnych wysokiego napięcia

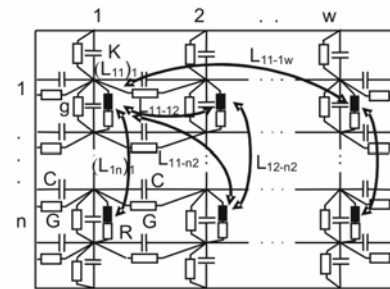
Skuteczna ochrona przepięciowa urządzeń elektrycznych jest jedną z metod stosowanych w celu zapewnienia niezawodności przesyłu i rozdziału energii elektrycznej. Obecnie, ze względu na wymagania prawa energetycznego, na przedsięwzięcia techniczne w sieciach elektrycznych, umożliwiające zwiększenie niezawodności 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 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 przepięciowych wewnętrznych układów izolacyjnych transformatorów energetycznych [22]. Podstawą analiz są wyniki badań oraz symulacji komputerowych. Prace teoretyczne obejmują przede wszystkim:

- doskonalenie modeli matematycznych uzwojeń,
- analizy narażeń wewnętrznych układów izolacyjnych 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. 2) [22]. Dotyczy ono głównie metod wyznaczania parametrów schematu z uwzględnieniem wpływu rdzenia ferromagnetycznego na indukcyjności

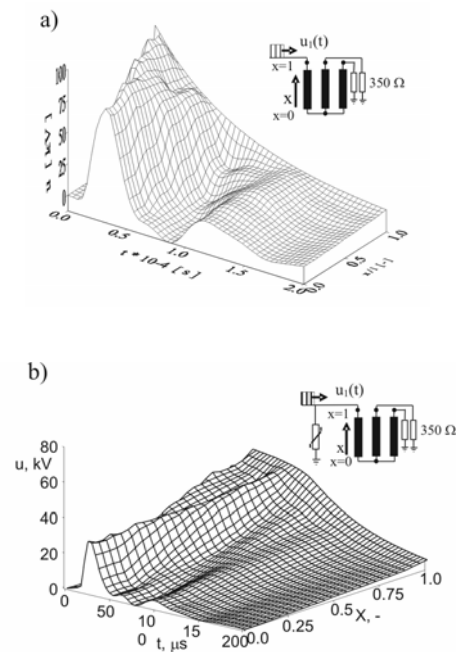
uzwojeń, zależności częstotliwościowych rezystancji uzwojeń, konduktywności izolacji oraz pojemności transformatorów.



Rys. 2. Schemat zastępczy uzwojeń transformatora z elementami o stałych skupionych

Fig. 2. Equivalent circuit of transformer windings with lumped parameters

Wyniki badań, prowadzonych w zakresie modelowania cyfrowego transformatorów są wykorzystywane w symulacjach numerycznych przepięć generowanych wewnątrz transformatorów (rys. 3) [22]. Stanowią one podstawę oceny skuteczności działania nowoczesnej ochrony przepięciowej oraz optymalizacji układów izolacyjnych transformatorów energetycznych.



Rys. 3. Rozkłady przepięć narażających układ izolacyjny doziemny uzwojeń wysokiego napięcia transformatora rozdzielczego: a) rozkład przepięć wewnętrznych podczas prób udarem piorunowym, b) rozkład przepięć w transformatorze chronionym ogranicznikami beziskiernikowymi

Fig. 3. Distributions of overvoltages influencing insulating system of distribution transformers HV windings: a) distribution of internal overvoltages during lightning impulse test, b) distribution of overvoltages in transformer protected by metal-oxide varistors

5. Pomiary i analiza wyładowań niepełnych

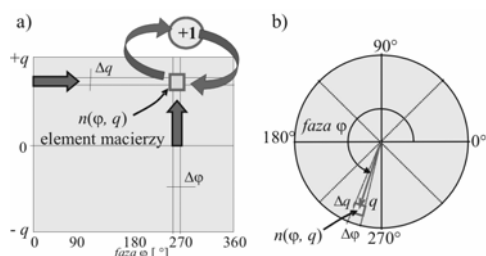
Wyładowania niepełne (wnz) są złożonymi, dynamicznymi zjawiskami fizycznymi, których oddziaływanie energetyczne na materiał układu izolacyjnego wywołuje w efekcie jego stopniową degradację, prowadząc – poprzez wywoływane procesy starzeniowe – do obniżenia lub całkowitej utraty własności izolacyjnych. Prace prowadzone w Katedrze Elektroenergetyki mają charakter zarówno badań podstawowych nad mechanizmami powstawania i rozwoju wyładowań, jak również celem ich jest uzyskanie wystarczających podstaw dla opracowania nowych

metod diagnozowania urządzeń znajdujących się w eksploatacji [2, 5, 14].

Możliwości zastosowania różnych metod rejestracji sygnałów wyładowań niepełnych 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.

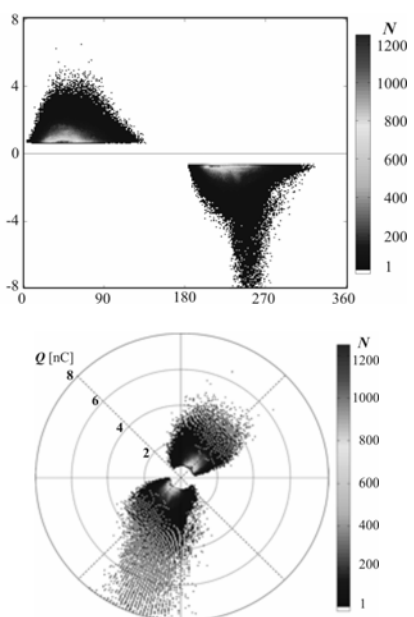
Wiarygodna diagnostyka stanu układów elektroizolacyjnych wysokiego napięcia jest zależna od rozwiązania zarówno problemów technicznych, jak i badawczych, związanych z: detekcją i rejestracją sygnałów wyładowań niepełnych, także w warunkach silnie zakłóconego, przemysłowego środowiska elektromagnetycznego; 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.

Wśród obecnych tendencji rozwojowych metod analizy wzn wymieniać 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 [5, 16, 35].



Rys. 4. Sposób tworzenia obrazów fazowo-rozdzielczych wzn w układzie współrzędnych: a) prostokątnych; b) biegunowych

Fig. 4. Method of phase-resolved PD images construction in two coordinates systems: a) Cartesian system, b) polar system

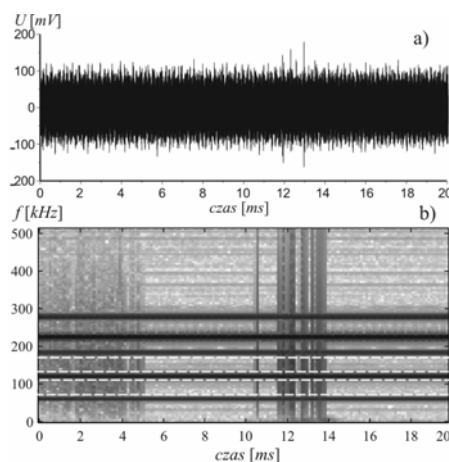


Rys. 5. Obraz $n(\varphi, q)$ wyładowań w izolacji pręta maszyny elektrycznej wizualizowany w układach współrzędnych prostokątnych i biegunowych

Fig. 5. The $n(\varphi, q)$ image of PD in insulation of electrical machine visualized in Cartesian and polar coordinate systems

W metodzie obrazów fazowo-rozdzielczych informacje na temat indywidualnych cech amplitudowo-fazowych pojedynczych impulsów wzn 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. 4a). Rozkład ten może być również wizualizowany w układzie współrzędnych biegunowych (rys. 4b). Przykład obu sposobów wizualizacji obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań przedstawiono na rysunku 5.

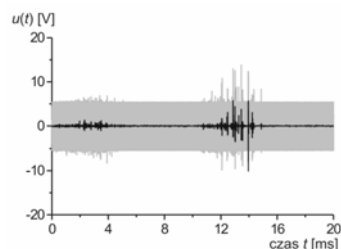
Metody czasowo-częstotliwościowe umożliwiają nie tylko obserwację zmian poziomu sygnałów wzn w okresie napięcia probierczego, ale również określenie towarzyszących im zakłóceń (rys. 6). W tym celu stosowane są np. procedury krótkoczasowego przekształcenia Fouriera (*STFT*) lub przekształcenia falkowego [35].



Rys. 6. Przykład analizy czasowo-częstotliwościowej wyładowań niepełnych:

a) sygnał wyładowań z zakłóceniami, b) spektrogram *STFT*
Fig. 6. Example of PD time-frequency analysis: a) PD signal with disturbances, b) the *STFT* spectrogram

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 7 przedstawiono wynik zastosowania filtracji falkowej sygnału wzn, użytej jako bank selektywnych filtrów dla usunięcia zakłóceń pasmowych, wysokoczęstotliwościowych.



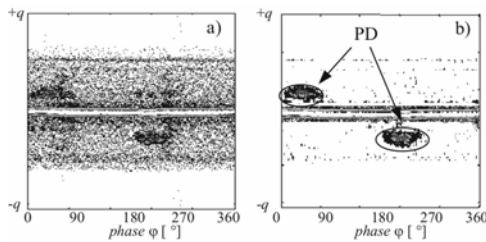
Rys. 7. Wynik filtracji falkowej sygnałów wyładowań niepełnych – sygnały przed i po filtracji

Fig. 7. Result of PD signals filtering by wavelet transform using – signals before and after filtering

Metody odszumiania falkowego zostały również zastosowane w celu poprawy jakości obrazów fazowo-rozdzielczych wyładowań (rys. 8) [17].

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 niezupełnych oraz tworzenie systemów wspomaganie podejmowania decyzji diagnostycznych.



Rys. 8. Rejestrowane *on-line* obrazy wyładowań w izolacji silnika 6kV/200kW: a) oryginal, b) po operacji odszumiania falkowego

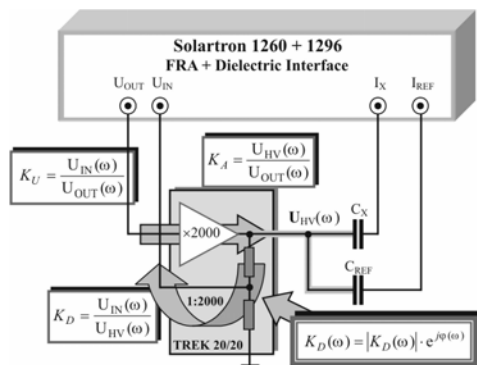
Fig. 8. *On-line* registered PD images from insulating system of 6kV/200kW motor: a) original, b) after wavelet denoising

6. Badania urządzeń elektrycznych metodami spektroskopii impedancyjnej

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 z przemiataniem częstotliwościowym. Wymieniona metoda spektroskopowa jest stosowana w badaniach:

- szerokopasmowej odpowiedzi dielektrycznej układów izolacyjnych [15, 10];
- 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. 9. Konfiguracja stanowiska pomiarowego wysokonapięciowej spektroskopii impedancyjnej

Fig. 9. High voltage impedance spectroscopy measuring system setup

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_{max}. Elementami składowymi tego stanowiska są (rys. 9):

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

7. Diagnostyka transformatorów metodą funkcji przenoszenia

Diagnostyka transformatorów energetycznych, jest obecnie intensywnie rozwijana. Czas pracy dużej liczby eksploatowanych transformatorów osiągnął granicę życia wyznaczoną przez producentów. Systematycznie i szybko wzrasta prawdopodobieństwo awarii takich transformatorów. W wielu zakładach przesyłu i rozdzielu energii elektrycznej są ograniczane inwestycje, a dominuje tendencja do eksploatacji istniejącego wyposażenia tak długo jak to jest możliwe ze względów technicznych.

Prace naukowe prowadzone w zakresie diagnostyki transformatorów w Katedrze Elektroenergetyki 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 [18]

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

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

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

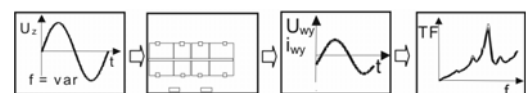
gdzie: U_z, U_{wy} – napięcie zasilania i napięcie wyjściowe, I_z, I_{wy} – prąd w uzwojeniu zasilanym i prąd wyjściowy transformatora.

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 [19, 20, 21].

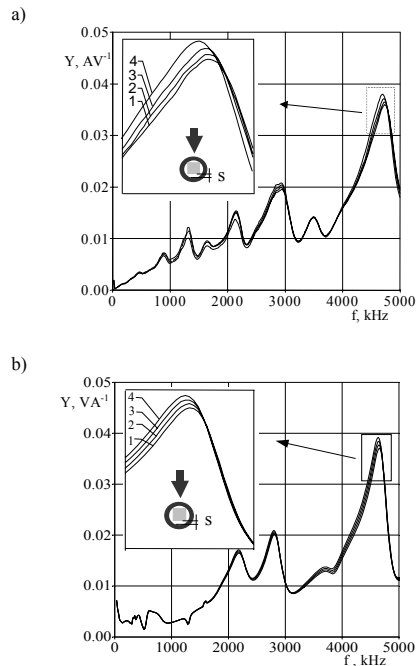
Badania uzwojeń polegają na wyznaczeniu funkcji przenoszenia dla dyskretnych wartości częstotliwości (rys. 10).



Rys. 10. Schemat blokowy wyznaczenia funkcji przenoszenia transformatorów
Fig. 10. Block scheme of transformers transfer function determination

Metoda umożliwia identyfikację niewielkich uszkodzeń uzwojeń (rys. 11a).

Symulacje numeryczne admitancji uzwojeń (rys. 11b) potwierdzają, że do wyznaczenia zależności częstotliwościowych admitancji transformatorów może być stosowany model cyfrowy ze stałymi skupionymi uzwojeń, używany do symulacji numerycznych przepięć wewnętrznych w transformatorach. Wyniki prowadzonych badań zarówno eksperymentalnych, jak i teoretycznych są podstawą prac dotyczących doskonalenia kryteriów oceny charakteru i zakresu uszkodzeń uzwojeń badanych metodą analizy odpowiedzi częstotliwościowej.



Rys. 11. Zależności częstotliwościowe admittancji uzwojenia transformatora przemieszczonego 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

Fig. 11. Admittance vs. frequency for transformer winding moved to core: a) measurement results, b) calculation results. 1) $s = 0,6$ cm (begin location), 2) $s = 0,4$ cm, 3) $s = 0,2$ cm, 4) $s = 0$ cm

8. Identyfikacja stanu elektromagnetycznego przestrzeni w otoczeniu układów elektroenergetycznych wysokich napięć

Znajomość stanu elektromagnetycznego przestrzeni – szczególnie pola elektrycznego i magnetycznego o częstotliwości sieciowej – w otoczeniu wysokonapięciowych układów przesyłowo-rozdziałczych jest niezbędna dla analizy i oceny skutków ich oddziaływań, a jego identyfikacja może być przeprowadzana metodami pomiarowymi [12, 13] lub obliczeniowymi [6, 7, 8, 27].

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. 12). Wzorzec oddany został do dyspozycji Głównego Urzędu Miar i w 1998 roku uczestniczył w ogólnoeuropejskich badaniach komparacyjnych [1].

Obecnie coraz częściej wyznaczanie rozkładu pola elektrycznego i magnetycznego realizowane jest w oparciu o metody numeryczne i odpowiednie programy komputerowe [6, 7, 8, 27]. Metody te, polegające na aproksymacji rozwiązania równania Laplace'a bądź Poissona w oparciu o metodę reszduów 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.: zwiśu przewodów w przęśle, wpływu słupów, profilu powierzchni ziemi, obecności człowieka, budynków itp.

Zastosowanie metody elementów skończonych (MES) pozwala efektywnie uwzględnić 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 przy-

gotowanie trójwymiarowego modelu geometrycznego obszaru z uwzględnieniem geometrii linii, słupów, budynków oraz rzeźby terenu.

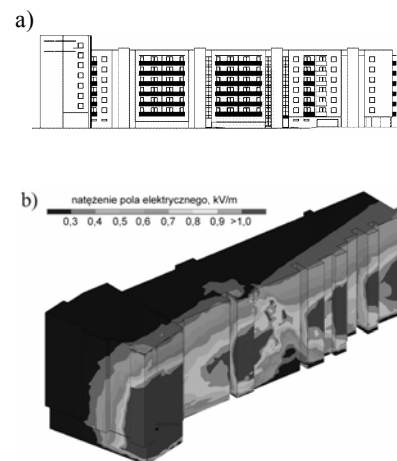


Rys. 12. Wzorzec pola elektrycznego w Katedrze Elektroenergetyki AGH według wymagań normy PN-IEC 833:1997

Fig. 12. Electric field reference source at Dept. of Electrical Power Engineering AGH-UST according to requirements of PN-IEC 833:1997 standard

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 [7, 27]. Najczęściej zagadnienia tego typu dotyczą lokalizacji budynków w sąsiedztwie linii wysokich napięć.

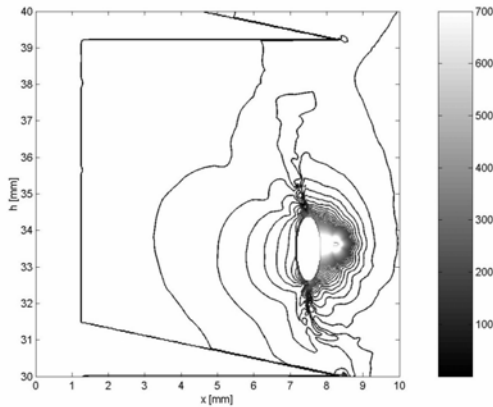
W analizie, której przykładowe wyniki przedstawiono na rysunku 13, zastosowano model trójwymiarowy, uwzględniający między innymi skomplikowaną rzeźbę terenu oraz konstrukcje wsporcze linii 110 kV. Model budynku uwzględniał lokalizację balkonów oraz wysokości trzonu głównego budynku i jego wyższej części południowej.



Rys. 13. Obiekt budowlany projektowany w pobliżu linii 110 kV: a) elewacja budynku, b) rozkład pola elektrycznego na elewacji budynku

Fig. 13. Building projected at location near 110kV overhead line: a) main view, b) electric field strength on surface of the building

Znajomość obrazów pola elektrycznego niezbędna jest także do oceny potencjalnych skutków jego oddziaływania w warunkach prac pod napięciem (PPN) [6, 8]. 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. 14).



Rys. 14. Obraz pola elektrycznego podczas PPN – izolacje co 20 kV/m
Fig. 14. Electric field image for live-working – isolines every 20kV/m

Do zespołu problemów dotyczących narażeń elektrycznych w elektroenergetycznych liniach przesyłowych wysokich napięć należy również oddziaływanie pola elektrycznego na trakt światłowodowe prowadzone wzdłuż tych linii. Jest to problem lokalizacji tych kabli w przeszłe linii napowietrznej ze względu na dopuszczalne wartości pola elektrycznego na ich powierzchni [9] oraz możliwe procesy degradacji powłok w warunkach rzeczywistych narażeń eksploatacyjnych [3, 4].

9. Literatura

- [1] EUROMET Comparison of AC Electric Field Strength EUROMET.EM-S6. Final report by Heinz Eckardt, Rainer Lippoldt, Physikalisch-Technische Bundesanstalt Abbestr. 2-12, D-10587 Berlin, FRG, November 2002
- [2] Florkowska B., Wyładowania niepełne w układach izolacyjnych wysokiego napięcia analiza mechanizmów, form i obrazów, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 1997
- [3] Florkowska B., Florkowska M., Timler M., Narażenia eksploatacyjne kabli światłowodowych ADSS w elektroenergetycznych liniach napowietrznych wysokiego napięcia, Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje nr 1, 2005, s.86-89
- [4] 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
- [5] Florkowska B., Florkowska M., Włodek R., Zydrón P., Mechanizmy, pomiary i analiza wyładowań niepełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Wyd. IPPT PAN, Warszawa, 2001.
- [6] Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A.: Modelowanie narażeń od pól elektrycznych i magnetycznych w warunkach prac pod napięciem, Energetyka, Zeszyt Tematyczny 1/2003, str. 27-29
- [7] 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
- [8] Florkowska B., Jackowicz-Korczyński A., Nowak W., Timler M., Modelowanie pól elektrycznych w warunkach prac pod napięciem. Przegląd Elektrotechniczny Konferencje, Rok 4, nr 1/2006
- [9] 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 3/2004, p.1183-1189
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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, 1'2005, str. 90-93
- [13] 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
- [14] Florkowska B., Włodek R., Pulse height analysis of partial discharges in air, IEEE Trans. El. Insul, 6, pp. 932-940, 1993.
- [15] Florkowska B., Zydrón P., Wysokonapięciowa spektroskopia impedancyjna w badaniach układów izolacyjnych wysokiego napięcia, Przegląd Elektrotechniczny Konferencje, Rok 2, nr 1'2004, str. 65-68, Warszawa, 2004
- [16] Florkowski M., Partial discharge image recognition using neural network for high voltage insulation systems, Rozprawy i Monografie nr 45, AGH, Kraków, 1996
- [17] Florkowski M., Wavelet based PD image denoising, Proc. 11th ISH, paper 5.21, London, 1999.
- [18] Florkowski M., Furgał J., Experimental and theoretical determination of transfer function of transformer windings. Arch. of Electr. Eng., Vol. L. II, No 2, 2003, str. 137-152
- [19] Florkowski M., Furgał J., Detection of transformer windings deformations based on the transfer function - Measurements and simulations, Meas. Scien. and Techn., No 14, 2003, pp. 1986-1992
- [20] 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
- [21] Florkowski M., Furgał J., The detection of winding faults of electrical machines using the frequency response analysis method. Meas. Scien. and Technol., 2004, No 15, pp. 2067-2074
- [22] Furgał J., Analiza narażeń przepięciowych izolacji transformatora chronionego iskernikowymi i beziskernikowymi ogranicznikami przepięć. Wyd. Nauk.-Dyd. AGH: Rozpr. i Monogr., Nr 118, 2003 r.
- [23] Furgał J., Analiza wybranych narażeń przepięciowych układów izolacyjnych transformatorów. Przegląd Elektrotechniczny - Konferencje, Nr 1, 2005 r., str. 108-111
- [24] Nowak W., Identyfikacja narażeń przepięciowych układów elektroenergetycznych wysokich napięć przy wyładowaniach atmosferycznych. Seria: Rozprawy i Monografie nr 139, Kraków, UWND AGH 2005
- [25] Nowak W., The analysis of backflashovers in high voltage overhead lines. Archives of Electrical Engineering, vol.LIV-No 213-3/2005, pp.321-341
- [26] Nowak W., Numerical modelling of lightning surges in high voltage substations. Archives of Electrical Engineering, vol.LVI-No 215-1/2006, pp. 31-45
- [27] Nowak W., Jackowicz-Korczyński A., Florkowska B., Komputerowa identyfikacja pól elektrycznych o częstotliwości sieciowej w otoczeniu obiektów elektroenergetycznych. Przegląd Elektrotechniczny, 1'2005, str. 176-179
- [28] Nowak W., Tarko R.: Ocena poziomu przepięć atmosferycznych w rozdzielni elektroenergetycznej 110 kV (w druku). Przegląd Elektrotechniczny, 2006
- [29] Nowak W., Tarko R., Florkowska B.: Wpływ ulotu elektrycznego na poziom przepięć atmosferycznych w rozdzielni 110 kV. Przegląd Elektrotechn., 1'2005, str. 180-183
- [30] Szczerbiński M., Multi-State Reliability Models for Lightning Hazard Assessment. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, vol. 1. No 1 (2004), 1- 12
- [31] 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
- [32] 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
- [33] Szczerbiński M., Lightning Hazards and Risk to Humans: some Case Studies. Journal of Electrostatics, vol. 59 (2003), 15-23
- [34] 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
- [35] Zydrón P., Zastosowanie analizy czasowej i częstotliwościowej do badania wyładowań niepełnych w układach izolacyjnych wysokiego napięcia, Rozprawa doktorska, AGH, Kraków, 2001