

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

**BADANIA WYSOKONAPIĘCIOWE NA WYDZIALE ELEKTRYCZNYM  
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ  
RYS HISTORYCZNY I STAN OBECNY**

**Zdobysław FLISOWSKI<sup>1)</sup>, Henryk RAWA<sup>2)</sup>**

1. Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa  
tel./fax: +48 22 6251914 e-mail: [zdobyslaw.flisowski@iem.pw.edu.pl](mailto:zdobyslaw.flisowski@iem.pw.edu.pl)
2. Politechnika Warszawska, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa  
tel./fax: +48 22 6251914 e-mail: [rawa@iem.pw.edu.pl](mailto:rawa@iem.pw.edu.pl)

**Streszczenie:** Referat ma charakter jubileuszowy, opracowany dla uczczenia setnej rocznicy urodzin Prof. Stanisława Szpora. Podano w nim krótki rys historyczny z sygnalną informacją o głównych kierunkach powojennych badań wysokonapięciowych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej i przedstawiono niektóre zagadnienia naukowe i dydaktyczne z zakresu zainteresowań członków Zespołu Techniki Wysokich Napięć w poprzednim Instytucie i obecnej Katedrze Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych. Skoncentrowano się głównie na zagadnieniach szeroko rozumianej ochrony odgromowej i przepięciowej zwracając uwagę na zdatną rejestrację wyładowań piorunowych, ocenę ryzyka szkód piorunowych i jej standardowe uproszczenia i skuteczność redukcji tego ryzyka za pomocą ekranów przestrzennych i urządzeń do ograniczania przepięć (SPD), jako głównych środków ochrony. Nawiązano też do kompatybilności elektromagnetycznej z uwagi na specyfikę ochrony urządzeń wrażliwych na zakłócenia elektromagnetyczne.

**Słowa kluczowe:** technika wysokich napięć, ochrona odgromowa, kompatybilność elektromagnetyczna

## 1. RYS HISTORYCZNY

Prace badawcze z zakresu techniki wysokich napięć i dziedzin pokrewnych mają na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej bogatą tradycję. Zostały zapoczątkowane przez wybitnych naukowców, jakimi byli Profesorowie: Kazimierz Drewnowski i Janusz Lech Jakubowski - twórcy przedwojennej i powojennej Katedry Wysokich Napięć. To właśnie z Katedry Prof. K. Drewnowskiego wywodził się Prof. St. Szpor, kierownik Katedry Wysokich Napięć Politechniki Gdańskiej i wielki autorytet w dziedzinie ochrony odgromowej.

W doborze tematyki badawczej okresu powojennego w Katedrze Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej kierowano się przede wszystkim potrzebami powstającego przemysłu elektrotechnicznego i rozbudowującego się wówczas systemu elektroenergetycznego. Podejmowano więc badania niezbędne do bezpośrednich zastosowań praktycznych z zakresu: wyładowań elektrycznych, wytrzymałości układów izolacyjnych, przepięć i ochrony urządzeń przed przepięciami oraz wysokonapięciowej techniki probierczej i pomiarowej. W miarę upływu czasu

pogłębiała się i rozszerzała tematyka specjalistyczna głównie w kierunku: badań piorunowych, zasad ochrony odgromowej, metod ograniczania przepięć, koordynacji izolacji, wyładowań niezupełnych, elektrofiltrów, czy wreszcie kompatybilności elektromagnetycznej. Wyniki badań służyły rozwojowi działalności publikacyjnej i często stanowiły podstawę zapisów normatywnych w tym międzynarodowych.

Dorobek naukowy naszego Ośrodka Warszawskiego jest znaczny i nie sposób jest go omówić na kilku stronach referatu. Dlatego zostaną przypomniani tylko nieliczni jego twórcy, którzy wyraźnie zaznaczyli swoją obecność na drodze rozwoju inżynierii wysokonapięciowej na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Do ich grona należy w pierwszej kolejności zaliczyć, wspomnianego już, prof. dr hab. J.L. Jakubowskiego, pierwszego po wojnie Dziekana Wydziału Elektrycznego, twórcę Instytutu Elektrotechniki i jego Dyrektora, twórcę pierwszego profesjonalnego Laboratorium Wysokich Napięć w Polsce, które w latach 70. ubiegłego stulecia zostało przekazane Wydziałowi. Prof. J.L. Jakubowski był promotorem wielu doktorów, inspiratorem prac habilitacyjnych (w tym pracy pierwszego z autorów niniejszego referatu) i jest autorem znanych, do dziś aktualnych monografii naukowych [1, 2].

Do innych osób, których z tej okazji nie sposób nie wspomnieć w kolejności historycznej, należą m.in.: doc. dr inż. W. Lidmanowski - uznany specjalista w dziedzinie techniki izolacyjnej, autor wielu popularnych skryptów; prof. dr A. Roguski - uznany specjalista z zakresu napięć powrotnych i wyładowań w gazach rozrzedzonych, wieloletni kierownik Zespołu w byłym Instytucie Wielkich Mocy i Wysokich Napięć; doc. dr inż. R. Krawczyński - uznany specjalista z zakresu wysokonapięciowej techniki probierczej i pomiarowej, współautor wielu publikacji. Kolejną pozycję w tym szeregu zajmuje pierwszy ze współautorów niniejszego referatu - specjalizujący się w zakresie techniki odgromowej, twórca teorii ryzyka szkód piorunowych, animator krajowych i międzynarodowych normatywnych postanowień, autor znanego podręcznika - monografii [3], promotor wielu doktorów i wreszcie wieloletni kierownik Zakładu Techniki Wysokich Napięć w byłym Instytucie Wydziałowym. Istotne pozycje w tym

szeregu zajmują też dr inż.: M. Kuźmiński, M. Łoboda i S. Ślusarek. Pierwszy specjalizuje się w zakresie techniki probierczo-pomiarowej, drugi – w zakresie urządzeń piorunochronnych i kompatybilności elektromagnetycznej, a także jest organizatorem laboratorium w tej dziedzinie i twórcą sieci zdalnej rejestracji wyładowań piorunowych, natomiast trzeci z nich jest uznanym specjalistą w dziedzinie wyładowań elektrycznych i elektrofiltrów.

Swoistym dramatem Zespołu Wysokich Napięć na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej było prawie jednoczesne osiągnięcie wieku emerytalnego przez jego członków i kończenie lub ograniczanie aktywności zawodowej. W efekcie, w przeciągu ostatnich 6 lat, z 12 osobowego zespołu pozostało 5 osób pracujących etatowo na Wydziale. Sztywne od wielu lat ramy zatrudnienia i brak możliwości odnowy Zespołu nie pozwoliły wypromować naturalnego następcy wspomnianych wyżej specjalistów i stworzyły konieczność opracowania na Wydziale programu odbudowy Zespołu. Zadanie to zostało powierzone drugiemu ze współautorów niniejszego referatu, który od 4 lat sprawuje funkcję kierownika – utworzonej w miejsce byłego Instytutu - Katedry Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych. Powodem do dumy jest aktualnie to, że w Zespole Wysokich Napięć pracuje 5 młodych, ambitnych asystentów, a kolejni będą przyjmowani.

## 2. AKTUALNY STAN BADAŃ NAUKOWYCH

Wymiana pokoleniowa, jaka dokonuje się w Katedrze jest okazją do nowego spojrzenia zarówno na tematykę badań naukowych, która w okresie powojennym koncentrowała się głównie na zagadnieniach przepięć i wytrzymałości układów izolacyjnych oraz ochrony odgromowej, jak i na proces kształcenia inżynierów i magistrów inżynierów – specjalistów z zakresu inżynierii wysokonapięciowej. W przypadku profilowania badań naukowych jest determinacją do podtrzymania wspomnianej wyżej specjalności naukowej z wyraźnym akcentem na poszerzenie tej tematyki, między innymi o zagadnienia kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń informatycznych w środowisku silnych pól elektromagnetycznych oraz zmianę metodologii pracy naukowej. Jest silnie akcentowane, w stosunku do asystentów przygotowujących doktoraty, wymaganie, by zamierzone eksperymenty poprzedzić pogłębionymi badaniami teoretycznymi, modelowaniem obwodowym lub polowym oraz symulacjami komputerowymi. Taka metodologia badań otwiera nowe obszary poznania – nawet w odniesieniu do obiektów i konfiguracji dobrze rozpoznanych. Do tematów podejmowanych z uwzględnieniem przyjętej metodologii należą między innymi: zagadnienia modelowania i symulacji oddziaływania na otoczenie informatyczne bezpośrednich wyładowań piorunowych w wysokonapięciową linię napowietrzną (mgr inż. T. Zdziarski), badanie poprzez modelowanie, symulację i weryfikację eksperymentalną skuteczności ochrony urządzeń informatycznych zasilanych z sieci n.n. (mgr inż. K. Sobolewski), modelowanie polowe i obwodowe oraz symulacja stanów zagrożeń piorunowych urządzeń stacyjnych (mgr P. Sul), badania teoretyczne i modelowanie zagrożenia uwarstwionych struktur dielektryków wyładowaniami degradującymi (mgr M.

Wojciechowski) oraz optymalizowanie stref ładowania drobiny pyłów za pomocą modelowania polowego i dokonywanych eksperymentów na modelu fizycznym (mgr A. Łasica).

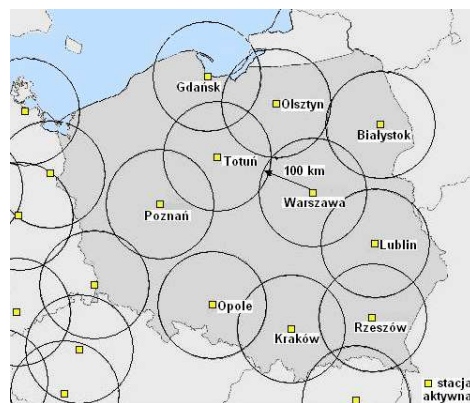
Z punktu widzenia wymogów związanych z kształceniem inżynierów specjalistów z zakresu inżynierii wysokonapięciowej problemem jest takie nauczanie, by absolwent o tej specjalizacji mógł oferować na rynku pracy swoje umiejętności poszerzone o specjalności pokrewne. Z dotychczasowych doświadczeń Katedry, w której obok problematyki wysokonapięciowej jest rozwijana problematyka związana z techniką łączenia obwodów wysokonapięciowych i wieloprądowych, dużym zainteresowaniem studentów cieszy się specjalizacja łącząca obie dziedziny. Stąd też w planach na przyszłość jest integrowanie Zespołu Wysokich Napięć i Zespołu Aparatów Elektrycznych, w którym to zespole dokonuje się identyczna wymiana pokoleniowa pracowników.

W dalszej części niniejszego referatu zostaną krótko omówione wybrane prace badawcze z zakresu ochrony odgromowej obiektów budowlanych, dotyczące w szczególności zdalnej rejestracji piorunów, ryzyka szkód piorunowych, ekranowania przestrzennego oraz doboru i lokalizacji urządzeń do ograniczania przepięć (SPD). Zostanie też dokonana krótka charakterystyka badań z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej (EMC).

## 3. BADANIA OCHRONY ODGROMOWEJ

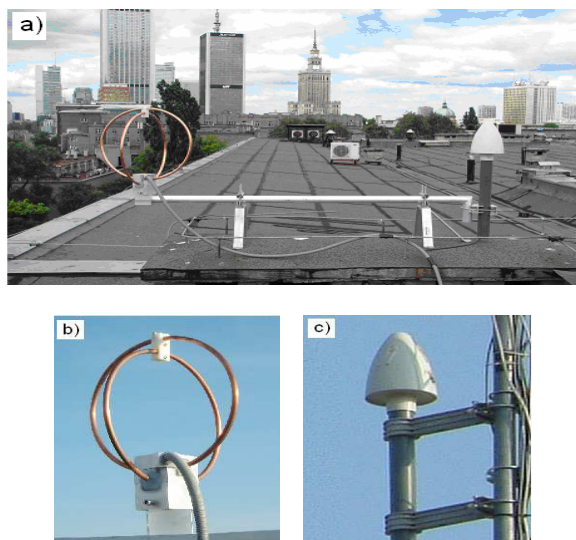
### 3.1. Zdalne rejestracje piorunów

Zdalną rejestracją piorunów zainteresowano się przed 40 laty, kiedy w kooperacji ze specjalistami szwedzkimi zainstalowano w Polsce 10 liczników typu CIGRE. Badania tą metodą zostały w pewnym momencie zahamowane, gdyż pojawiały się trudne do rozwiązania problemy natury technicznej. Jednocześnie pojawiły się nowe technologie pomiaru i rejestracji, w kierunku których skierowano zainteresowania - początkowo tylko teoretyczne - gdyż na realizację systemu brakowało funduszy. Na przełomie lat 90-tych powstała możliwość uzyskania grantu KBN, ale z niejasnych przyczyn inicjatywa zespołu utworzonego przez pierwszego z autorów referatu została stoperowana. Dopiero w 2006 r., z inicjatywy dr. M. Łobody [4], zastała podjęta współpraca z niemieckimi specjalistami, mająca na celu organizację na terenie polski sieci LINET, która docelowo ma liczyć 11 stacji (rys.1).



Rys. 1. Rozmieszczenie sensorów LINET i obszarów z dobrym rozróżnieniem zdarzeń IC-CG w Polsce

Sensor stacji LINET, wyposażony w magnetyczną zamkniętą pętlę antenową i w moduł GPS (rys. 2), jest przyłączony do komputera klasy PC, z którego dane są przesyłane łączami Internetowymi do centrali w Niemczech (Monachium). Rejestrowane w ten sposób dane ulegają tam przetworzeniu. Zawierają one między innymi informacje o wyładowaniu, czasie jego wystąpienia, rodzaju, amplitudzie prądu, biegunowości, błędzie lokalizacji, przetworzonych numerycznie kształtach fal i o rejestrujących sensorach. Informacje te są dostępne przez Internet i umożliwiają wizualizację i animację zdarzeń archiwizowanych.



Rys. 2. Widok: a) anten sensora LINET na gmachu Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej, b) pętlowej anteny magnetycznej, c) modułu GPS

Dzięki archiwizacji możliwa jest weryfikacja i uzupełnienie niezbyt precyzyjnych danych pochodzących z istniejącej już w kraju sieci PERUN (SAPHIR 3000) [5] i z częściowo pokrywającej Polskę europejskiej sieci EUCLID [6, 7]. Sieci te działają w zakresie częstotliwości małych (VLF/LF) lub dużych (VHF) i mogą identyfikować zarówno wyładowania doziemne (CG), jak i wyładowania międzymurowe (IC). LINET wykorzystuje małe częstotliwości i charakteryzuje się m. in. takimi użytecznymi właściwościami, jak: duża skuteczność detekcji dla obydwu rodzajów wyładowań (CG i IC) oraz optymalna dokładność lokalizacji wyładowań. Na rysunku 3 pokazano przykładowy obraz wyładowań doziemnych zarejestrowany w 2006 przez LINET na terenie Polski.

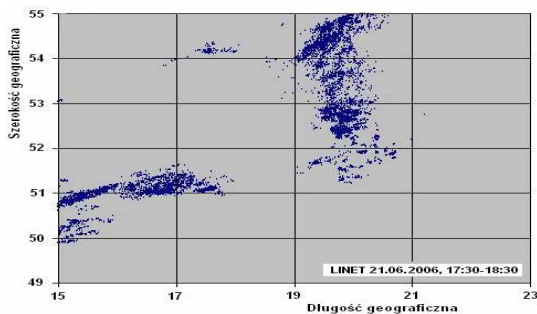
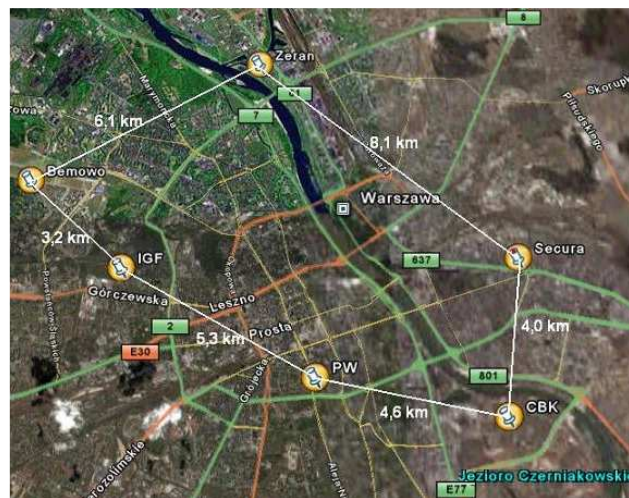


Fig. 3. Obraz zarejestrowany przez LINET nad terytorium Polski, dnia 21.06.2006, w godz. 17:30-18:30

Niezależnie od sieci LINET Katedra Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych Politechniki Warszawskiej, współpracując z Instytutem Geofizyki PAN oraz Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej, w ramach europejskiego programu COST P18 „Fizyka wyładowania piorunowego i jego skutków”, podjęła w 2007 r. pracę nad budową w rejonie Warszawy Lokalnej Sieci Detekcji Piorunów (LLDN - Local Lightning Detection Network). Tego rodzaju sieci są organizowane w celu zwiększenia skuteczności detekcji i dokładności lokalizacji głównie wyładowań CG.

Lokalna sieć warszawska składa się z sześciu oddzielnych stacji (rys. 4) wyposażonych w 2 anteny pola elektrycznego  $E$  (płaskiej i prętowej), działających w paśmie częstotliwości od 20 Hz do 20 kHz, ze wzmocnieniem na wejściu  $> 60$  dB i stałą czasową  $\tau = 1$  s, a także w dwukanałowe cyfrowe rejestratory, zsynchronizowane z sygnałami czasu GPS przez 2 anteny, oraz w 14 bitowy przetwornik A/D z indywidualną pamięcią banku danych. Dodatkowo, począwszy od sezonu burzowego 2008 r., do badań przygotowano dwie szybkie kamery i jeden miernik pola.



Rys. 4. Lokalizacja sześciu stacji LLDN w Warszawie

Głównym celem tej sieci jest: uzyskanie na stosunkowo małym obszarze dodatkowego czułego źródła danych o piorunach doziemnych (CG) i weryfikacja danych pochodzących z systemów PERUN i LINET. Dane te dotyczą głównie lokalizacji udarów, wartości ich prądów i charakterystyki wyładowań wielokrotnych. Dysponowanie nimi przyczyni się istotnie do zwiększenia dokładności oceny ryzyka szkód piorunowych, której słusznie nadano w aktualnej międzynarodowej normie ochrony ogromnej [8] priorytetowe znaczenie.

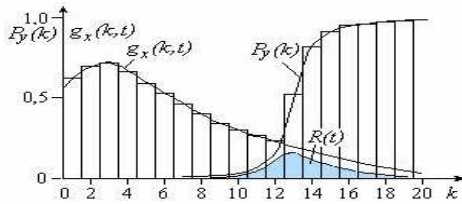
### 3.2. Ryzyko szkód piorunowych

Standardowa metoda oceny ryzyka szkód piorunowych [8] wywodzi się z jego analizy [9] opracowanej pod koniec lat 1970 w Zakładzie Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej, a następnie rozwijanej [10 ÷ 13] we współpracy z Uniwersytetem Rzymskim „La Sapienza”. Według tej metody wartość ryzyka  $R(t)$  wynika z konfrontacji odpowiednio sformatowanych narażeń  $x$  obiektu i jego odporności  $y$  na te narażenia.

Narażenia  $x$  są reprezentowane dyskretną funkcją  $g_x(k, t)$  ich statystycznego rozkładu w zależności od czasu  $t$  i liczby  $k$  groźnych zdarzeń piorunowych, a odporność  $y$  jest charakteryzowana dyskretną funkcją  $P_y(k)$  skumulowanego rozkładu uszkodzeń w zależności od liczby  $k$  groźnych zdarzeń piorunowych. Suma iloczynów tych dwu funkcji w całym zakresie zmian liczby  $k$  ( $0 < k < \infty$ ) daje ryzyko  $R(t)$  wyrażone zależnością

$$R(t) = \sum_{k=0}^{\infty} g_x(k, t) P_y(k) \quad (1)$$

Graficzna jej interpretacja jest przedstawiona na rysunku 5. Jak łatwo stwierdzić, obie rozpatrywane funkcje  $g_x(k, t)$  i  $P_y(k)$  mają wyraźnie dyskretny charakter.



Rys. 5. Graficzna interpretacja zależności ryzyka  $R(t)$ .

Proces wyładowań piorunowych może być uznany za jednorodny i stacjonarny. Przy założeniu, że liczba rozpatrywanych uderzeń piorunowych jest nieograniczona, rozkład narażeń  $x$  obiektu może być wyrażony funkcją Poissona, jak następuje

$$g_x(k, t) = \frac{(Nt)^k}{k!} e^{-Nt} \quad (2)$$

gdzie:  $N$  – roczna częstość oddziaływających na obiekt piorunów,  
 $t$  – liczba rozpatrywanych lat.

Funkcja  $g_x(k, t)$  oznacza prawdopodobieństwo, że dokładnie  $k$  piorunów wystąpi w przedziale czasu  $<0, t>$ . Prawdopodobieństwo, że piorun nie wystąpi ( $k = 0$ ) jest równe

$$g_x(0, t) = e^{-Nt} \quad (3)$$

Udary piorunowe są zdarzeniami rozłącznymi, tworzącymi probabilistyczny układ zupełny, dla którego suma prawdopodobieństw jest równa jedności, a zatem

$$G_x(k, t) = \sum_{k=0}^{\infty} g_x(k, t) = 1 \quad (4)$$

Prawdopodobieństwo, że wystąpi przynajmniej jedno zdarzenie piorunowe wynika z różnicy  $G_x(k, t) - g_x(0, t)$  i jest równe

$$G_x(k \geq 1, t) = 1 - e^{-Nt} \quad (5)$$

Skumulowany rozkład  $P_y(k)$  z zależności (1) reprezentuje prawdopodobieństwo wystąpienia różnych skutków uderzeń piorunowych, jak: uszkodzenia

mechaniczne pożar, wybuch, porażenie ludzi, awarie urządzeń elektrycznych i elektronicznych itp. Jeżeli prawdopodobieństwo wystąpienia szkody  $y$  wskutek jednego wyładowania piorunowego jest równe  $P$ , to prawdopodobieństwo, że przy  $k$  wyładowaniach szkoda nie wystąpi, jest równe

$$(1 - P)^k \quad (6)$$

a skumulowany rozkład prawdopodobieństwa zostaje wyrażony zależnością

$$P_y(k) = 1 - (1 - P)^k \quad (7)$$

Wstawiając wyrażenia (2) i (7) do zależności (1) i odpowiednio ją przekształcając, uzyskuje się następujące wyrażenie na ryzyko

$$R(t) = 1 - e^{-NPt} \quad (8)$$

Wyrażenie to może być jednocześnie interpretowane, jako skumulowany rozkład czasu oczekiwania na uszkodzenie. Zwykle ryzyko wystąpienia uszkodzenia jest odnoszone do jednego roku. Wówczas czas  $t = 1$ , a iloczyn  $NP$  jest skumulowanym poziomem ryzyka wyrażonego wzorem

$$R = 1 - e^{-NP} \quad (9)$$

Jeżeli w rozpatrywanym okresie liczba  $N$  jest stała, to o poziomie ryzyka decyduje prawdopodobieństwo  $P$ .

Skumulowany poziom ryzyka  $NP$  pomnożony przez względną wartość strat  $L$ , będących konsekwencją uszkodzenia, lub innymi słowy iloczyn  $NPL$ , jest w normie [8] definiowany, jako ryzyko, a prawdopodobieństwo, że wystąpi względna strata na poziomie  $NPL$ , wyraża się wzorem

$$R = 1 - e^{-NPL} \quad (10)$$

Jeżeli  $NPL \ll 1$ , to przyjmuje w przybliżeniu wartość ryzyka, czyli

$$R = 1 - e^{-NPL} \approx NPL \quad (11)$$

Jak widać, oszacowanie ryzyka sprowadza się do wyznaczenia czynników iloczynu  $NPL$ , tj. liczby  $N$  wyładowań oddziaływających na obiekt, prawdopodobieństwa  $P$  wystąpienia szkody pod wpływem jednego wyładowania i względnej wartości  $L$  powodowanych przez szkodę strat.

Średnia liczba  $N$  oddziaływających na obiekt wyładowań wynika z iloczynu

$$N = N_g A \quad (12)$$

gdzie:  $N_g$  – roczna gęstość wyładowań doziemnych (1/km<sup>2</sup>/rok);  
 $A$  – powierzchnia równoważna zbierania wyładowań: przez obiekt ( $A_1$ ), przez pobliskie jego otoczenie ( $A_2$ ), przez wchodzące do obiektu linie ( $A_3$ ) i przez bliskie ich sąsiedztwo ( $A_4$ ).

Prawdopodobieństwo  $P$  jest kombinacją częściowych prawdopodobieństw występowania: 1) różnych szkód przy jednym trafieniu pioruna i 2) określonej szkody przy

trafieniach w różne części układu ( $A_1, A_2, A_3, A_4$ ). Kombinację tę można zapisać w postaci:

$$P = \sum_{i=1}^n p_i \left[ 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_{ij}) \right] \quad (13)$$

gdzie:  $p_i$  – prawdopodobieństwo trafienia piorunu w określoną część  $i$  układu ( $A_1, A_2, A_3, A_4$ ) i dodatkowo w określoną część obiektu (np. w zwody i w obiekt z ominięciem zwodów);  $p_{ij}$  – prawdopodobieństwo wystąpienia różnych szkód  $j$  wskutek danego trafienia piorunu.

Wartości  $p_i$  tworzą probabilistyczny układ zupełny i ich suma jest równa jedności. Natomiast wartości  $p_{ij}$  są miarą różnych uszkodzeń, zależnych od własności obiektu i jego wyposażenia oraz od parametrów prądu pioruna i mogą być ujęte iloczynem

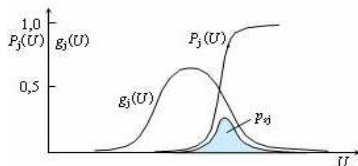
$$p_{ij} = p_j p_{sj} \quad (14)$$

gdzie:  $p_j$  – prawdopodobieństwo wystąpienia lub istnienia medium podlegającego uszkodzeniu pod wpływem  $j$ -tego źródła;  $p_{sj}$  – prawdopodobieństwo wystąpienia  $j$ -tego źródła uszkodzeń (np. iskry).

Prawdopodobieństwo  $p_{sj}$  zostało zilustrowane na rysunku 6 i może być wyrażone zależnością

$$p_{sj} = \int_0^{\infty} g_j(U) P_j(U) dU \quad (15)$$

gdzie:  $g_j(U)$  – funkcja gęstości rozkładu narażeń  $U$  wywołanych przez  $j$ -te źródło;  $P_j(U)$  – rozkład prawdopodobieństwa uszkodzeń wywołanych przez to źródło.



Rys. 6 Graficzna interpretacja zależności (15) przy założeniu ciągłych funkcji rozkładu szkód.

Gdy chodzi o straty, a więc ostatni czynnik iloczynu  $NPL$ , to ich wartość można wyznaczyć z ogólnej zależności

$$L = \frac{n_p}{n_t} \frac{t_p}{8760} \quad (16)$$

gdzie:  $n_p$  – prawdopodobna wartość strat;  $n_t$  – wartość całego obiektu;  $t_p$  – czas występowania w obiekcie zagrożonego medium.

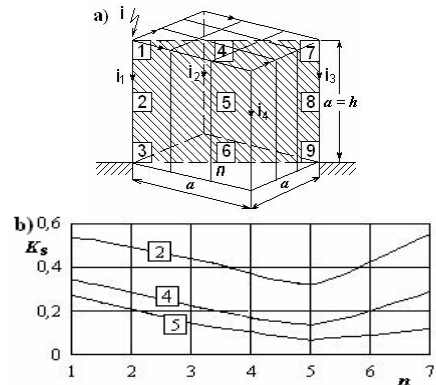
W standardowym podejściu do omawianych zagadnień poczyniono znaczne uproszczenia i zastosowano szereg procedur formalnych [8]. Wyodrębniono 8 różnych komponentów ryzyka szkód piorunowych: 3 (tj.  $R_A, R_B$  i  $R_C$ ) związane z bezpośrednim trafieniem piorunu w obiekt, 1 (tj.  $R_M$ ) związany z oddziaływaniem na obiekt wyładowania pobliskiego, 3 (tj.  $R_U, R_V, R_W$ ) związane z bezpośrednim trafieniem piorunu w we wchodzące do obiektu linie i 1 (tj.  $R_Z$ ) związany z oddziaływaniem

wyładowania pobliskiego na wchodzące do obiektu linie. Komponenty  $R_A$  i  $R_U$  określają ryzyko porażenia istot żywych, komponenty  $R_B$  i  $R_V$  dotyczą szkód fizycznych w obiekcie, a pozostałe komponenty ( $R_C, R_M, R_W$  i  $R_Z$ ) ujmują częściowe wartości ryzyka, związane z powstającymi w obiekcie i wnikającymi do niego przepięciami. Wartości wymienionych komponentów są wyznaczane wg zależności (11), przy indywidualnej ocenie poszczególnych jej wielkości, tj.  $N_X, P_X$  i  $L_X$ , przy czym  $x$  jest ogólnym symbolem danego komponentu. Ryzyko całkowite wyznacza się z sumy właściwych jego komponentów.

Jak łatwo stwierdzić, w ocenie ryzyka szczególne znaczenie ma zagrożenie powodowane oddziaływaniem przepięć (4 komponenty), w tym przepięć indukowanych i wnikających przez wprowadzane do obiektu linie. Aby to zagrożenie zmniejszyć niezbędne jest stosowanie w pierwszym przypadku dobrego ekranowania (obiektu, pomieszczeń i urządzeń), w drugim zaś - skutecznego ograniczania przepięć za pomocą prawidłowo dobranych i zainstalowanych SPD. Miarą skuteczności ekranowania może być współczynnik redukcyjny  $K_s$ , a miarą skuteczności działania SPD - współczynnik redukcyjny  $K_{SPD}$ . Redukują one prawdopodobieństwo wystąpienia szkody, a przez to i wartość odpowiedniego komponentu ryzyka.

### 3.3. Ekranowanie przestrzenne

Obiekt lub jego część, w której znajduje się obwód narażony na niebezpieczne przepięcia indukowane przez bezpośrednie lub pobliskie wyładowania piorunowe powinien być otoczony ekranem w postaci ażurowej klatki. Skuteczność ekranu można określić za pomocą współczynnika  $K_s$ , którego wartość wyznacza się ze stosunku napięć indukowanych w pętli ekranowanej i nieekranowanej. Im wartość współczynnika jest mniejsza tym skuteczność ekranowania większa. Zagęszczając przewody ekranu, zmniejsza się na ogół wartość współczynnika, ale przy pewnej ich liczbie wartość ta może ulec zwiększeniu, co zależy od zmian w rozplywie prądu. Ponadto wartość ta zależy od miejsca usytuowania pętli w chronionej przestrzeni. Stwierdzić to można na podstawie wykonanych badań laboratoryjnych [14, 15] i obliczeń, których układ modelowy i wyniki pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Badanie skuteczności ekranowania: a) model układu, b) zależność  $K_s = f(n)$  w pozycji 2, 4 i 5 ( $n$  – liczba przewodów ekranu)

W wyodrębnionych obszarach badano napięcia indukowane w pętlach ekranowanych (zwiększając

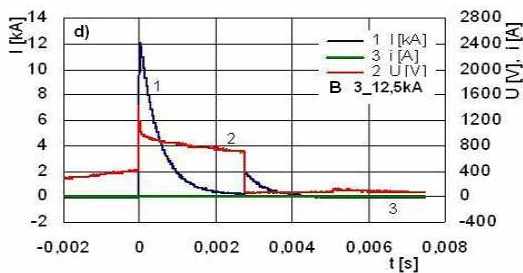
stopniowo liczbę przewodów ekranu) i nieekranowanych. Jak widać, ze wzrostem w każdej ścianie liczby przewodów do 5 współczynnik maleje, po czym znowu rośnie. Skuteczność jest największa w środku ekranu, a blisko krawędzi (tj. w pobliżu dróg prądowych) maleje tak, że przy krawędzi bardziej odległej od kanału pioruna współczynnik redukcji może przyjmować wartości  $K_s > 1$ .

Na podstawie różnych analiz można stwierdzić, że w przypadku praktycznych ekranów, poczynając od zwykłych układów LPS a kończąc na układach o bardzo zagęszczonych przewodach, współczynnik redukcyjny zmienia się w przedziale wartości od  $K_s = 1$  (brak ekranu) do  $K_s = 10^{-4}$  (bardzo duże zagęszczenie przewodów).

### 3.4. Dobór i lokalizacja SPD

Skuteczność działania SPD zależy od warunków lokalnych i każdy przypadek chronionych urządzeń powinien być rozpatrywany indywidualnie. Nie można bezkrytycznie polegać na ofertach producentów SPD. Przy doborze i lokalizacji tych urządzeń do istotnych czynników należą: istnienie lub brak zewnętrznego LPS i innych środków (ekranów), podział prądu na wejściu instalacji do obiektu, długość, układ oraz parametry podlegających ochronie obwodów i urządzeń, charakter wyodrębnionych strefach ochronnych (LPZ), a także obciążalność energetyczna urządzeń ochronnych i chronionych. Należy dostosować SPD w miejscu ich instalowania do obciążalności prądowej i energetycznej.

W celu sprawdzenia obciążalności prądowej SPD przeprowadzono obszernie ich badania. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe wyniki próby klasy I warystorowych SPD typu 1+2. Jak się okazuje obciążalność impulsowa tych urządzeń nie przekracza 10 kA i w przypadku wielu obiektów wyposażonych w LPS może być niewystarczająca.

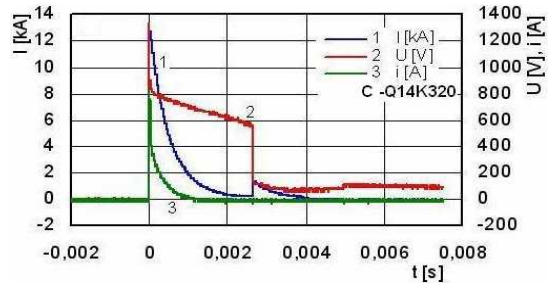


Rys. 8. Przykład ilustrujący uszkodzenie SPD typu 1+2, przy udarze prądowym 10/350 i  $I_{imp} = 12,5$  kA

Inną ważną sprawą jest prawidłowa koordynacja napięciowa i energetyczna urządzeń chroniących i chronionych. Bez tej koordynacji nie może być mowy o skutecznej ochronie. Pokazują to wyraźnie wyniki przeprowadzonych badań, których przykład podano na rysunku 9. Warystor typu Q14K320, chroniony przez SPD typu 1+2, został uszkodzony przy doprowadzeniu do układu udaru o prądzie  $I_{imp} = 12,5$  kA, co nie powinno mieć miejsca.

Gdy SPD nie jest dostatecznie blisko chronionego urządzenia, to napięcie na jego zaciskach może przekroczyć wartość wytrzymawanego napięcia  $U_w$ , mimo iż poziom ochrony  $U_p$  nie przekracza tego napięcia (tj. gdy  $U_p < U_w$ ). Wzrost napięcia na końcu obwodu może być spowodowany

zarówno oscylacjami układu, jak i zjawiskami indukcyjnymi.



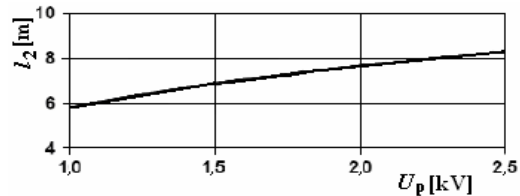
Rys. 9. Charakterystyki z prób koordynacyjnych warystora typu Q14K320 z SPD typu 1+2 bez iskriernika.

W pierwszym przypadku napięcie na zaciskach chronionego urządzenia może osiągnąć podwójną wartość  $U_{pm} = 2U_p$ , gdy obwód osiągnie długość [16]

$$l_2 = \frac{U_p v}{2R \frac{di}{dt}} \quad (17)$$

gdzie:  $v$  – prędkość propagacji fal w rozpatrywanym obwodzie,  $R$  - rezystancja uziemienia,  $di/dt$  – stromość narastania udaru prądowego

Na rysunku 10 przedstawiono zależność  $l_2$  od poziomu ochrony  $U_p$  przy rezystancji  $R = 10 \Omega$ , prędkości  $v = 200$  m/ $\mu$ s i standardowej stromości narastania udarów następujących.



Rys. 10. Długość  $l_2$ , przy której  $U_{pm} = 2U_p$ , w zależności od poziomu ochrony, gdy  $R = 10 \Omega$

W drugim przypadku chodzi głównie o napięcie  $U_i$  indukowane w pętli przez prąd płynący w najbliższym przewodzie odprowadzającym. Napięcie to jest powodowane istnieniem sprzężenia magnetycznego pomiędzy tymi obwodami i jest ono tym większe im dłuższa długość obwodu i stromość narastania prądu jest większa. W zależności od długości obwodu chronionego powinny być spełnione następujące warunki:

- 1)  $U_p < U_w$ , gdy długość obwodu jest bardzo mała,
- 2)  $U_p < 0,5 U_w$ , gdy obwód ma długość bliską  $l_2$ , a napięcie indukowane jest pomijalne;
- 3)  $U_p < 0,5 U_w - U_i$ , gdy obwód ma dużą długość i napięcie indukowane jest znaczące.

Oznacza to, że długość obwodu między SPD a urządzeniem chronionym powinna być kontrolowana i w razie potrzeby obwód powinien być skracany lub wyposażony w dodatkowe SPD lub inne środki ochrony. Istnienie dobrze skoordynowanego układu SPD pozwala przyjąć współczynnik redukcyjny o wartości  $K_{SPD} = 10^{-2}$ .

#### 4. EKSPERYMENTALNE BADANIA EMC

Wyposażenie obiektów budowlanych w urządzenia coraz bardziej wrażliwe na oddziaływanie pól elektromagnetycznych stwarza poważny problem ochrony tych urządzeń nie tylko przed ich uszkodzeniem, ale i przed zakłócaniem ich pracy. Zasadniczym źródłem zagrożenia są piorunowe impulsy elektromagnetyczne (LEMP). Istnieje więc problem rozpoznania mechanizmów tego oddziaływania, wyznaczania poziomu zagrożenia i odporności zagrożonych urządzeń oraz doboru właściwych środków ochrony. Wśród mechanizmów wyróżnia się głównie sprzężenia indukcyjne udarów piorunowych z obwodami urządzeń i wnikanie do nich tych udarów za pomocą połączeń przewodowych. Oddziaływania te i ich skutki mogą być groźne i powinny być ograniczane, ale dobór środków redukcji jest niemożliwy bez rozeznania warunków lokalnych, a w tym parametrów narażonych urządzeń i ich obwodów. Ponieważ problem narasta, istnieje potrzeba jego upowszechnienia i właściwego przygotowania specjalistów do działań w tym zakresie. Nie jest to możliwe bez dysponowania właściwymi narzędziami badań analitycznych i eksperymentalnych. Zwłaszcza te ostatnie znajdują się w centrum szerszego zainteresowania z uwagi na aktualną ich przydatność, relatywnie duże koszty i ograniczoną dostępność. Doceniono to w Zespole Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej i przed kilku laty uznano za niezbędne podjęcie działań w kierunku rozszerzenia bazy laboratoryjnej i włączenia jej do zmodyfikowanego programu nauczania specjalistycznego Inżynierii Wysokonapięciowej i ogólnowydziałowego programu nauczania kompatybilności elektromagnetycznej.

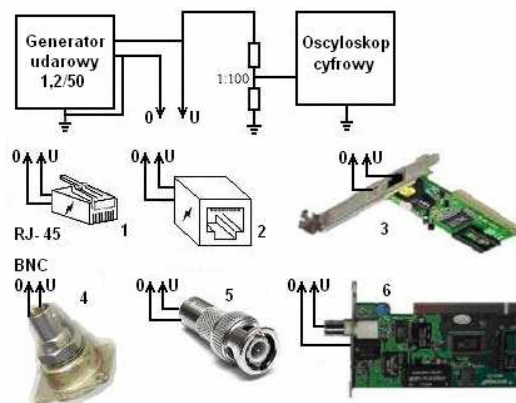
Laboratorium Zespołu Wysokich Napięć zostało już wyposażone m.in. w takie urządzenia, jak:

- generator BEST emc firmy Schaffner, umożliwiający: generację ESD do 16,5 kV, impulsów EFT/Burst do 4,4 kV, udarów 1,2/50 $\mu$ s do 4,4 kV i udarów 8/20 $\mu$ s oraz symulację dynamicznych zmian napięcia zasilania;
- trzy generatory napięć udarowych piorunowych i/lub łączeniowych o wartości szczytowej do 2 800 MV;
- dwa generatory udarów prądowych o kształcie 8/20  $\mu$ s i zbliżonym do kształtu 10/350  $\mu$ s i amplitudach do 80 kA.
- źródła napięć probierczych przemiennych do 750 kV i stałych do 200 kV.
- osiem oscyloskopów cyfrowych firmy Tektronix, w tym jeden czterokanałowy typu TDS 3034, 350 MHz, 2,5 GS/s (z funkcją FFT i zestawem sond pomiarowych) oraz siedem typu TDS 210, 220 i 224, 60 – 100 MHz, 1 GS/s;
- dwie anteny aktywne firmy EMCO, w tym pętlicowa typu 6507 do pomiaru natężenia pola magnetycznego w paśmie od 1 kHz do 30 MHz. oraz prętowa typu 3301 B do pomiaru natężenia pola elektrycznego w paśmie częstotliwości od 30 Hz do 50 MHz;
- zestaw mierników firm: Bell, Radiation Technology i 3M do pomiaru natężenia pola elektrycznego, magnetycznego niskiej częstotliwości i elektrostatycznego;
- układ światłowodowy firmy Tektronix do napięciowej separacji i do pomiaru sygnałów w paśmie do 100 MHz
- urządzenia firmy Fluke, w tym analizator jakości napięcia zasilania (typu 43) i system rejestracji i monitoringu parametrów sieci nn., typu VR 1011S.

Do badań wykorzystywana jest metalowa ekranująca klatka Faradaya o wymiarach 2  $\times$  2  $\times$  2 m, a dzięki sieci CDN 117

i antenom INA 701 w generatorze firmy Schaffner istnieje też możliwość sprzęgania impulsów zakłóceń w tory sygnałowe i badania odporności urządzeń na oddziaływanie pól magnetycznych o częstotliwości sieciowej do 4 A/m i impulsowych do 2200 A/m.

W programie badań są wykorzystywane pełne możliwości wyposażenia laboratoryjnego, zarówno w zakresie generacji i pomiaru parametrów zakłóceń, jak i w zakresie badań odpornościowych. Na rysunku 11 podano przykład układu do badania napięciowej odporności udarowej elementów systemu informatycznego wraz z poddanymi badaniom elementami.



Rys. 11. Układ do badania napięciowej odporności udarowej połączeń informatycznych; 1 - Wtyczka RJ-45 bez ekranu; 2 - Gniazdo RJ-45 bez ekranu; 3 - Karta sieciowa z gniazdem RJ45; 4 - Wtyczka BNC, napięcie przebicia 4,4 kV; 5 - Gniazdo BNC; 6 - Karta sieciowa z wtyczką BNC;

Na podstawie przeprowadzonych badań odporności elementów wyszczególnionych na rysunku 11 można stwierdzić, że najmniejszą wytrzymałość 1,3 kV wykazuje karta sieciowa z wtyczką BNC, nieco większą wytrzymałość 1,5 kV wykazuje karta sieciowa z gniazdem RJ-45, a wytrzymałość samych gniazd i wtyczek kształtuje się na poziomie 2,3 kV ÷ 4,6 kV. Oznacza to, że wytrzymałość tych elementów odpowiada wymaganiom normatywnym, zgodnie z którymi powinna kształtować się ona na poziomie 1,0 kV, a w niektórych przypadkach nie powinna być mniejsza niż 0,5 kV. Podobną lub nawet nieco mniejszą wytrzymałość dopuszcza się dla komponentów systemów alarmowych. Wartości te świadczą o tym, że w przypadku takich elementów istnieje potrzeba ograniczania tu przepięć do relatywnie niskiego poziomu.

#### 5. UWAGI KOŃCOWE

Na tle przeprowadzonych rozważań można stwierdzić, że Zespół Wysokich Napięć Politechniki Warszawskiej przeżył w okresie swojego istnienia przez różne etapy bardziej i mniej intensywnego rozwoju, chociaż na przełomie ostatniego wieku zarysował się nawet pewien jego kryzys, który należy już do przeszłości i jest nadzieja na dalszy intensywny rozwój Zespołu.

Przeprowadzone w Zespole Wysokich Napięć prace badawcze przyczyniły się m.in. do uściślenia zbioru danych o parametrach wyładowań piorunowych, do opracowania w skali międzynarodowej standardowej metody oceny szkód

piorunowych, do wyznaczenia normatywnych wskaźników skuteczności ekranów przestrzennych i do zasad doboru i lokalizacji urządzeń do ograniczania przepięć.

Działalność badawcza, koncentrująca się wcześniej głównie na zagadnieniach szeroko pojętej ochrony odgromowej i przepięciowej została rozwinięta w kierunku zagadnień kompatybilności elektromagnetycznej urządzeń informatycznych występujących w środowisku silnych pól elektromagnetycznych.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. Jakubowski J. L.: Podstawy teorii przepięć w układach energoelektrycznych. PWN Warszawa, 1968.
2. Jakubowski J. L.: Fale wędrowne w układach energoelektrycznych. PWN Warszawa, 1962.
3. Flisowski Z.: Technika Wysokich Napięć WNT Warszawa 1987 (2005 wyd. V) ISBN 83-204-3077-1.
4. Loboda M. at all: A new lightning detection network in Poland. International Conference on Grounding and Earthing; Maceió - Brazil November, 2006
5. Maciążek, A., B. Bartosik: Availability of Lightning data in Poland from the Lightning Detection System SAFIR 3000 – IMGW. 18<sup>th</sup> Int. Lightning Detection Conf. (ILDC), Ref. No. 41, Helsinki 2004 (Finland).
6. Loboda M., Thern S., Maciążek A.: Comparison of Lightning Data over Poland from CELDN and SAFIR 3000 in 2002-2003”, European Lightning Detection Workshop (ELDW), Helsinki 2004 (Finland)
7. Schulz W., Lojou J-Y.: Total Lightning Detection Network in Central Europe: The F.L.A.S.H. Project. 9th International Lightning Detection Conference 24-25 April 2006, Tucson, Arizona, USA
8. PN-EN 62305-2:2006 (U). Ochrona odgromowa - Część 2: Zarządzanie ryzykiem.
9. Flisowski Z.: Analiza zagrożenia piorunowego obiektów budowlanych. Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1980, Prace Naukowe Elektryka Z. 63, str. 1-151.
10. Flisowski Z., Mazzetti C.: A new approach to the complex assessment of the lightning hazard impending over buildings. Bull. of the Polish Academy of Sciences Vol. 32 Nr 9 – 10, 1984, s. 571 – 581.
11. Flisowski Z., Mazzetti C.: Il Rischio di danno per fulminazione atmosferica delle structure. L'Energia Elettrica No 2 – 1985, s. 47 – 58.
12. Flisowski Z., Mazzetti C., Lo Piparo G.B.: Probabilistic approach to the selection of lightning protection system. XIX ICLP, Graz 1988, R-2.13
13. Mazzetti Z., Ratti U., Flisowski Z.: "Risk Assessment Procedure for the Protection of Electronic Systems against Lightning" Proc. of 22nd International Conference on Lightning Protection (ICLP), Budapest - Hungary, Sept. 19 - 23, 1994. Paper R 5-02.
14. Flisowski Z., Mazzetti C.: "Efficiency of lightning protection system as a screening measure against LEMP". EMC'96, 17 - 20 Sept. 1996, Roma.
15. Mazzetti C., Flisowski Z.: "Spatial distribution of lightning interferences inside different LPS models". 13th International Wrocław Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility, June 25 - 28, 1996, Wrocław.
16. Amicucci G. L., at all: Surge protective devices for low voltage systems - practical approach for the protection distance evaluation. Power Tech 2007, July 1-5, 2007, Lausanne, Switzerland. Paper ID: 160

## HIGH VOLTAGE INVESTIGATIONS PERFORMED ON THE ELECTRICAL ENGINEERING FACULTY OF WARSAW UNIVERSITY OF TECHNOLOGY SHORT HISTORY AND PRESENT STATE

**Key words:** high voltage technology, Lightning Protection, electromagnetic compatibility.

**Abstract:** The paper is of jubilee nature, elaborated for the celebration of hundred birthday anniversary of Prof. Stanislaw Szpor. A short history with also short information on the main directions of the postwar high voltage investigations performed at the Electrical Engineering Faculty of Warsaw University of Technology and some of scientific and didactic problems belonging to the area of the interest of the High Voltage Engineering Team members of the former Institute and the present Department of High Voltage Engineering and Electrical Apparatus have been in the paper presented. It has been concentrates mainly on the problems of widely comprehended protection against lightning and overvoltages, giving the attention to the distant registration of lightning discharges, the assessment of the risk of lightning damages and its normative simplifications as well as the efficiency of the risk reduction by means of spatial screens and surge protective devices (SPD) being the main protection measures. It has been also referred to the electromagnetic compatibility because of specificity of protection of devices sensitive to the electromagnetic disturbances.