

EMC-LabNet: Laboratorium Techniki Wysokich Napięć im. prof. zw. dr hab. inż. Andrzeja Sowy na Politechnice Białostockiej

Streszczenie. Artykuł przedstawia rozwój oraz perspektywy potencjału naukowo-badawczego i infrastruktury Laboratorium Techniki Wysokich Napięć im. prof. zw. dr hab. inż. Andrzeja Sowy. Laboratorium funkcjonuje na Wydziale Elektrycznym Politechniki Białostockiej i wchodzi w skład Polskiej Sieci Laboratoriów EMC (EMC-LabNet). Zaprezentowano kierunki badań naukowych i infrastrukturę oraz ofertę badawczą laboratorium.

Abstract. The article presents the development and perspectives of the scientific-research potential and the infrastructure of the Laboratory of High Voltage Technique named after prof. Andrzej Sowa, DSc PhD Eng. The laboratory operates at the Faculty of Electrical Engineering of Białystok University of Technology and is a part of Polish EMC Laboratories Network (EMC-LabNet). The directions of scientific research, the infrastructure and the research offer of the laboratory have been presented. (EMC-LabNet: Laboratory of High Voltage Technique named after prof. Andrzej Sowa, DSc PhD Eng. at Białystok University of Technology).

Słowa kluczowe: kompatybilność elektromagnetyczna, impulsowe narażenia elektromagnetyczne, wyładowania piorunowe, wysokonapięciowa technika probiercza i pomiarowa.

Keywords: electromagnetic compatibility, impulse electromagnetic disturbances, lightning discharges, high-voltage test and measurement technique.

Wstęp

Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) oraz wysokonapięciowa technika prób i pomiarów to obszary, w których Wydział Elektryczny Politechniki Białostockiej od wielu lat rozwija swoje doświadczenie, potencjał naukowy i aparaturę badawczą. Tematyka prowadzonych badań naukowych i prac zleconych, wiedza i kompetencje nabywane przez pracowników oraz stale rozwijana infrastruktura doprowadziły do ugruntowania się specjalizacji, która skupia się wokół zagadnień impulsowych narażeń elektromagnetycznych, w szczególności generacji-symulacji wyładowań piorunowych oraz ochrony przed tymi wyładowaniami.

Uczelnia od 2013 roku jest członkiem konsorcjum naukowo-technologicznego Polska Sieć Laboratoriów EMC (EMC-LabNet). Jest to wspólne przedsięwzięcie w zakresie infrastruktury badawczej jednostek naukowo-badawczych o wiodącej w kraju pozycji w określonych specyficznych obszarach EMC. W skład konsorcjum wchodzi Politechnika Wroclawska – lider, OBR Centrum Techniki Morskiej S.A. w Gdyni, Politechnika Białostocka, Politechnika Rzeszowska oraz Wojskowa Akademia Techniczna. 14 sierpnia 2014 roku Konsorcjum zostało wpisane na Polską Mapę Drogową Infrastruktury Badawczej.

Jako konsorcjant projektu Uczelnia rozbudowuje i unowocześnia infrastrukturę wykorzystywaną do realizacji badań naukowych i świadczenia usług badawczych w zakresie rozwijanej specjalizacji EMC.

Badania naukowe prowadzone w laboratorium techniki wysokich napięć i narażeń piorunowych

Historycznie pierwszy i zarazem główny kierunek badań naukowych prowadzonych w laboratorium techniki wysokich napięć i narażeń piorunowych Politechniki Białostockiej stanowi ocena zagrożeń powstających podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w różne obiekty budowlane. Próby oceny takich zagrożeń podejmowane na świecie już od kilkudziesięciu lat obejmują rejestracje prowadzone podczas:

- naturalnego [1, 2] lub prowokowanego [3-5] wyładowania piorunowego w obiekt;
- wymuszonego przepływu prądu udarowego w instalacjach i przewodzących elementach konstrukcji obiektu [6, 7] lub skalowanego modelu instalacji obiektu [8].

Coraz częściej do oceny zagrożeń piorunowych wykorzystuje się także wyniki badań symulacyjnych prowadzonych za pomocą specjalistycznych programów komputerowych, powszechnie dostępnych na zasadach ogólnej licencji jak i komercyjnych [7, 9-11].

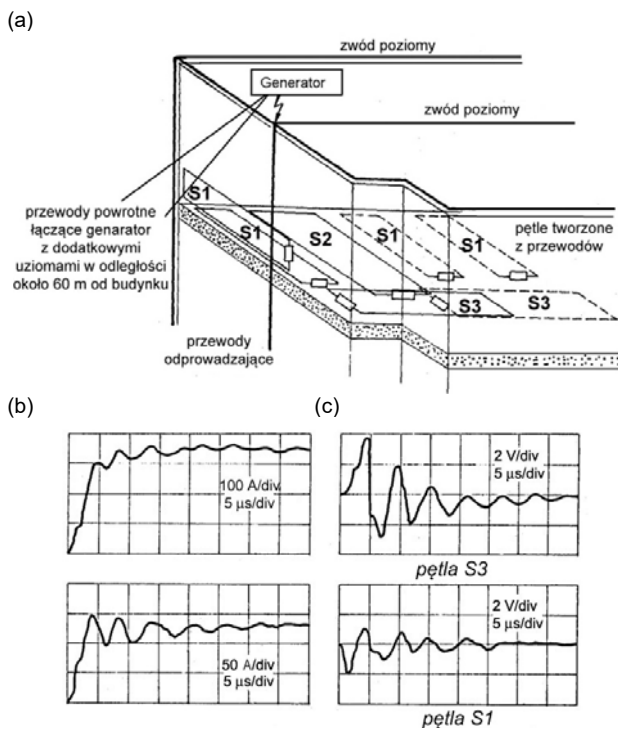
Wyniki badań wykorzystywane są do wstępnej oceny:

- poziomów napięć indukowanych w instalacjach wewnątrz obiektów budowlanych;
- skuteczności ekranowania konstrukcji budynku przed piorunowym polem elektromagnetycznym;
- różnych rozwiązań wykorzystywanych do odprowadzania prądów piorunowych.

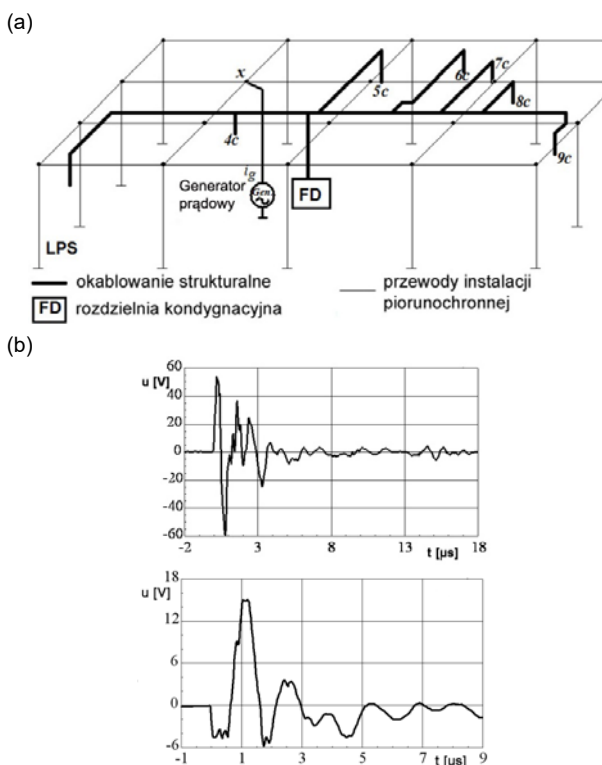
Metodę badań polegającą na wymuszeniu przepływu prądu udarowego po raz pierwszy w kraju zastosowano w Politechnice Białostockiej, do oceny zagrożenia piorunowego urządzeń elektronicznych w dwupiętrowym obiekcie budowlanym [12]. Z generatora umieszczonego na dachu budynku wprowadzano do przewodów urządzenia piorunochronnego prądy udarowe o czasach narastania czoła 2-3 μ s i czasach do półszczytu ok. 700 μ s oraz o wartościach szczytowych do 350 A (rys. 1). Rejestrowano przepięcia w pętliach przewodów ułożonych na ścianach i podłodze w pomieszczeniu na drugim piętrze.

W kolejnym kroku symulowano narażenia piorunowe w instalacji elektrycznej i okablowaniu strukturalnym budynku [16]. Prąd udarowy wytwarzany przez generator umieszczony wewnątrz budynku doprowadzono do zwodów urządzenia piorunochronnego za pomocą rury aluminiowej (rys. 2). Prąd płynął w obwodzie generator - rura - instalacja piorunochronna - system uziomowy - generator. Zastosowany generator umożliwił osiągnięcie wyższych wartości szczytowych prądu, do 1550 A. Czasy narastania czoła wynosiły od kilku do kilkunastu mikrosekund.

Podobne badania prowadzono w stacjach bazowych telefonii komórkowej składających się z wieży antenowej (50-60 m) oraz szaf „outdoor” i/lub kontenera z aparaturą stacyjną [17]. Prąd udarowy wytwarzany przez generator umieszczony u podstawy wieży doprowadzono izolowanym przewodem do szyny wyrównawczej na szczycie wieży (rys. 3). Prąd ten rozprzynał się w konstrukcji wieży, systemach wyrównywania potencjałów i uziomowym, a następnie powracał do generatora kilkoma przewodami dołączonymi do uziemionego ogrodzenia stacji lub do elektrod wbitych w ziemię w odległości kilku-kilkunastu metrów od stacji.



Rys. 1. Badania narażeń w pętlach przewodów ułożonych w budynku podczas wymuszonego przepływu prądu udarowego w instalacji piorunochronnej (a) [13] oraz przebiegi prądów udarowych (b) i napięć indukowanych w przewodach (c) [13-15]

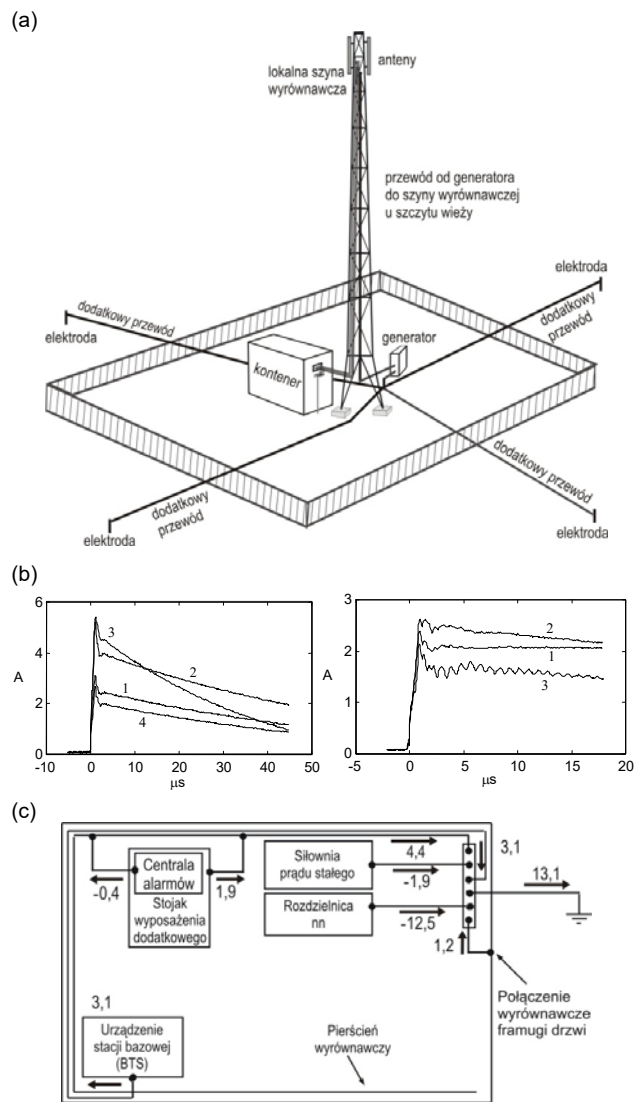


Rys. 2. Badania narażeń w instalacji elektrycznej i okablowaniu strukturalnym budynku podczas wymuszonego przepływu prądu udarowego w instalacji piorunochronnej (a) oraz przebiegi napięć w gniazdach sieci komputerowej (b) [14-16]

Zdając sobie sprawę z wad i ograniczeń stosowanej metody badań, które uniemożliwiają bezpośrednie wykorzystanie wyników do oceny zagrożenia piorunowego, opracowano procedurę pozwalającą ocenić to zagrożenie

pośrednio [17] w oparciu o wyniki symulacji numerycznych z wykorzystaniem specjalistycznego oprogramowania [18]. Procedura ta wymaga podjęcia następujących działań:

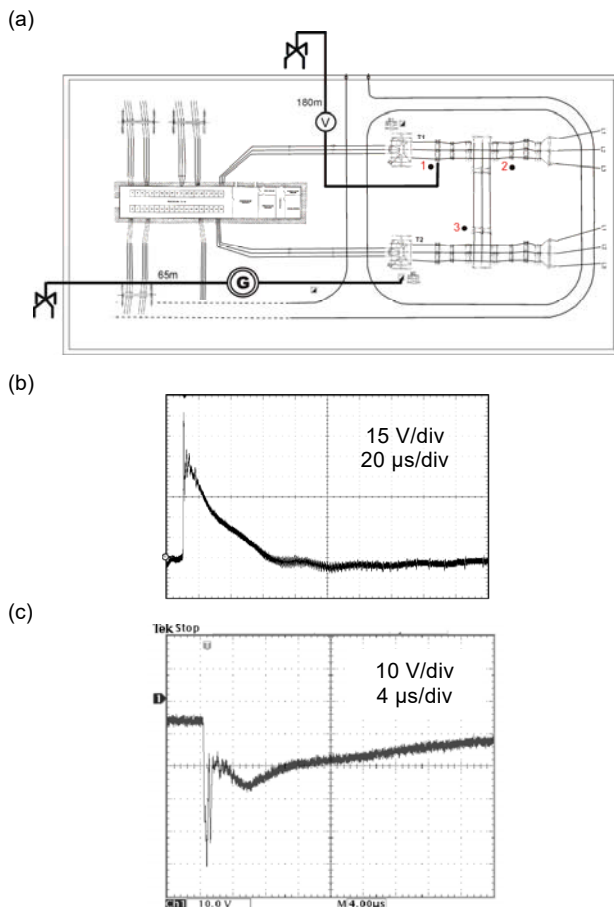
- przeprowadzenie rejestracji prądów i napięć wywołanych przez wymuszony przepływ prądu udarowego;
- stworzenie modelu symulacyjnego uwzględniającego zjawiska zachodzące w obiekcie podczas badań z wymuszonym prądem udarowym oraz zoptymalizowanie tego modelu w oparciu o wyniki pomiarów;
- wykorzystanie stworzonego modelu symulacyjnego obiektu do przeprowadzenia symulacji zjawisk zachodzących podczas wyładowania piorunowego oraz analiza wyników i ocena zagrożenia piorunowego.



Rys. 3. Badania narażeń w stacjach bazowych podczas wymuszonego przepływu prądu udarowego (a) [13], przebiegi prądów w przewodach powrotnych obwodu generatora i przewodach uziomowych słupów wieży (b) [15], podział prądu (%) w systemie wyrównywania potencjałów w kontenerze (c) [13-15]

Nieco inne zasady prowadzenia badań zaproponowano w przypadku stacji elektroenergetycznych, jako że obiekty te muszą pracować w czasie prowadzenia badań, co uniemożliwia dokonanie bezpośrednich pomiarów prądu udarowego rozprzyskającego się w systemie uziomowym i utrudnia rejestrację przepięć [19]. Prąd udarowy doprowadzono do punktów najbardziej narażonych na bezpośrednie wyładowania piorunowe (zwody pionowe,

iglice umieszczone na bramkach liniowo-szynowych, punkty uziemiające ograniczniki przepięć w rozdzielnicy 110 kV). Prąd rozptywał się w uziomie stacji oraz w instalacjach metalowych oraz nakładał się na sieć potrzeb własnych i układ elektroenergetyczny. Do zamknięcia obwodu prądu udarowego wykorzystano cztery pomocnicze elektrody wbijane w ziemię poza obszarem stacji połączone przewodem z generatorem (rys. 4). Rejestrowano lokalny wzrost potencjału pomiędzy wybranymi punktami na terenie stacji a sztuczną ziemią odniesienia, którą stanowiła dodatkowa elektroda wbita w ziemię poza terenem stacji i połączona przewodem powrotnym z oscyloskopem. Prowadzono również rejestracje napięć na zaciskach wejściowych zabezpieczeń cyfrowych CZIP-L.



Rys. 4. Badania zagrożeń w stacjach elektroenergetycznych podczas wymuszonego przepływu prądu udarowego (a) [13-15]; przebieg skoku potencjału jednego z punktów na terenie stacji (b) [14]; przebieg potencjału szyny wyrównawczej w sterowni (c) [13]

Równolegle z opisanymi badaniami terenowymi, na Wydziale Elektrycznym prowadzono też badania i analizy teoretyczne zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w kanale wyładowania piorunowego oraz zjawisk związanych z rozptyłem prądów piorunowych w obiektach trafionych przez wyładowanie i oddziaływaniem impulsowego pola elektromagnetycznego. Badania takie, prowadzone na świecie już od wielu lat zmierzają m.in. do stworzenia dokładnego modelu matematycznego wyładowania piorunowego oraz określenia zależności pomiędzy prądem wyładowania a wytwarzanym przez niego impulsowym polem elektromagnetycznym. Poza prostymi inżynierskimi modelami analitycznymi [20], rozwijane są także modele oparte na teorii antenowej [21-24].

Poza opisanymi głównymi kierunkami badań naukowych należy także wspomnieć o nie mniej istotnych badaniach o tematyce pokrewnej. Najważniejsze z nich to:

- badania narażeń udarowych (eksperymenty z wymuszonym przepływem prądu udarowego) oraz piorunowych (symulacje z zastosowaniem reprezentatywnych przebiegów prądu pioruna) w różnorodnych obiektach budowlanych [25-26];
- badania eksperymentalne i symulacyjne w zakresie właściwości udarowych uziemień oraz rozkładu potencjału i napięć krokowych na powierzchni gruntu [27-28];
- badania symulacyjne w zakresie zagrożeń przeskokami napięciowymi i wyznaczania odstępów izolacyjnych w miejscach zbliżenia instalacji niskonapięciowych do elementów urządzenia piorunochronnego [29];
- wyznaczanie ryzyka strat powodowanych przez wyładowania piorunowe w różnorodnych obiektach zgodnie z normą PN-EN 62305-2 [30];
- badanie skuteczności ochrony przeciwprzebieciowej w sieciach niskiego napięcia z równoległe łączonymi warystorami [31];
- badanie skuteczności działania elementów dystansujących zapewniających zachowanie wymaganego odstępu separacyjnego w instalacjach odgromowych [32].

Infrastruktura badawcza laboratorium

W początkowym okresie działalności, wyposażenie laboratorium skupiało się głównie wokół pełnionych funkcji dydaktycznych. Rozwinięto sześć stanowisk laboratoryjnych do przedmiotu technika wysokich napięć oraz cztery do przedmiotów kompatybilność elektromagnetyczna i ochrona przeciwzakłóceń. Obejmują one:

- badanie rozkładu napięcia na łańcuchu izolatorów;
- badanie wytrzymałości elektrycznej powietrza w różnych układach elektrod przy napięciu przemiennym i stałym;
- metody pomiaru wysokiego napięcia;
- badanie generatorów udarowych;
- badanie wytrzymałości udarowej powietrza w różnych układach elektrod;
- badanie izolacji papierowo-olejowej;
- generatory udarowe;
- wyładowanie elektrostatyczne;
- elementy i układy do ograniczania przepięć;
- badanie właściwości ochronnych odgromników gazowych.

Podstawowa baza aparaturowa wykorzystywana w dydaktyce była stopniowo nowocześniejsza i wzbogacana o specjalistyczną infrastrukturę wykorzystywaną głównie do prowadzenia badań naukowych a także do opracowywania ekspertyz technicznych i prac zleconych. Główne punkty zwrotne w tym procesie stanowiły inwestycje budowlane i aparaturowe poczynione w ramach projektów UE, m.in.:

- 2012 - 2015, projekt Rozbudowa i modernizacja infrastruktury badawczej Politechniki Białostockiej w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej 2007-2013 – Zakup generatora prądu piorunowego 10/350 μ s o wartości szczytowej do 100 kA;
- 2012 - 2015, budowa Centrum Badawczo-Dydaktycznego WE PB w ramach dwóch projektów komplementarnych finansowanych z RPO województwa Podlaskiego i przeniesienie laboratorium do nowej siedziby;
- 2011 - 2016, projekt INNO-EKO-TECH Innowacyjne centrum dydaktyczno-badawcze alternatywnych źródeł energii, budownictwa energooszczędnego i ochrony środowiska Politechniki Białostockiej (Program Operacyjny Infrastruktura i Środowisko 2007-2013) – Budowa *Laboratorium badawczego narażeń piorunowych alternatywnych źródeł energii*, które wyposażono w dwa

stanowiska do badań odporności z wykorzystaniem generatora napięć i prądów udarowych o różnych kształtach oraz przenośnego generatora udaru napięciowo-prądowego 1,2/50-8/20 μ s o wartościach szczytowych do 10 kV - 5 kA.

Obecnie główne wyposażenie laboratorium stanowią:

- generator prądu impulsowego (piorunowego) o kształcie 10/350 μ s i wartości szczytowej do 100 kA przy napięciu do 4 kV (rys. 5);



Rys. 5. Generator prądu udarowego (piorunowego) o kształcie 10/350 μ s i wartości szczytowej do 100 kA, napięcie do 4 kV

- generator prądu udarowego 8/20 μ s o wartości szczytowej do 60 kA (przy 6 kV) wraz z zestawem anten do wytworzenia impulsowego pola elektrycznego i magnetycznego;
- generator napięć udarowych 1,2/50 μ s o wartości szczytowej do 300 kV;
- generator napięć udarowych 1,2/50 μ s o wartości szczytowej do 37 kV;
- generator napięć udarowych 10/700 μ s o wartości szczytowej do 37 kV;
- generator udarów napięciowych i prądowych o różnych kształtach do 50 kA i 10 kV;
- generator wyładowań elektrostatycznych (ESD) do 16 kV;
- generator napięciowo-prądowy przenośny, wytwarzający napięcia udarowe 1,2/50 μ s o wartości szczytowej do 10 kV lub prądy udarowe 8/20 μ s o wartości szczytowej 5 kA, oraz sieć sprzęgająco-odsprzęgająca 32 A;
- generator napięć udarowych łączeniowych o regulowanym kształcie i wartości szczytowej do 180 kV;
- transformatory probiercze TP-60, TP-110, TP-350, o napięciach w zakresie od 1 do 350 kV.

Podstawowy sprzęt pomiarowy obejmuje:

- zestaw 10 oscyloskopów o paśmie przenoszenia od 350 MHz do 2,5 GHz;
- zestaw cewek Rogowskiego do pomiaru prądów od 1 mA do 300 kA z izolacją WN;
- zestaw sond prądowych opartych na hallotronie o prądach nominalnych 10 A, 30 A, 150 A, 750 A;
- zestaw sond napięciowych do 40 kV;
- dzielniki napięciowe do 300 kV;
- sonda napięciowa różnicowa 1,5 kV;
- aktywna sonda wysokoczęstotliwościowa 2,5 GHz;
- miernik rezystancji izolacji MIC-5005;
- aparat do badania oleju ABO-80EP;
- przyrząd do pomiaru współczynnika tangens delta ADTR-2K;
- stanowisko do zdalnej rejestracji i przesyłu wyników pomiarów (5 kompletów: oscyloskop RTM2032, 2 sondy RT-CH10, Cewka Rogowskiego).

Nowy wysokonapięciowy generator prądu piorunowego

W 2021 roku, laboratorium zyskało nowe, unikatowe możliwości badawcze w zakresie oddziaływania prądów udarowych o parametrach uznanych za reprezentatywne do oceny skutków działania rzeczywistych prądów piorunowych, zgodnych z normami [33-36]. Obecna rozbudowa infrastruktury badawczej laboratorium jest realizowana przez konsorcjum:

- Politechnika Wroclawska – lider,
 - OBR Centrum Techniki Morskiej S.A.,
 - Politechnika Bialostocka,
 - Politechnika Rzeszowska,
 - Wojskowa Akademia Techniczna,
- w ramach projektu pn. „Polska Sieć Laboratoriów EMC” (EMC-LabNet), finansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego ze środków Działania 4.2 Rozwój Nowoczesnej Infrastruktury Badawczej Sektora Nauk, Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój 2014-2020. Część inwestycyjna zadania Politechniki Bialostockiej obejmuje zakup i wdrożenie mobilnego stanowiska badawczego do badania odporności na wyładowania piorunowe.

Laboratorium rozbudowano o wysokonapięciowy mobilny generator prądu udarowego o kształcie 10/350 μ s i wartości szczytowej do 200 kA uzyskiwanej przy napięciu ładowania kondensatorów do 120 kV (rys. 6).



Rys. 6. Generator prądu udarowego (piorunowego) o kształcie 10/350 μ s i wartości szczytowej do 200 kA, napięcie do 120 kV

Parametry te umożliwiają badanie prądem o dużej wartości szczytowej, który odzwierciedla prąd doziemnego wyładowania piorunowego, przy jednoczesnym testowaniu wytrzymałości napięciowej obiektu badanego napięciem do 120 kV. Większość generatorów użytkowanych na świecie umożliwia wprawdzie uzyskanie tak dużej wartości prądu, ale przy znacznie niższym napięciu.

Ta unikatowa cecha generatora pozwoli na znalezienie słabych punktów obiektu badanego zarówno pod względem jego wytrzymałości napięciowej jak również wytrzymałości na prąd udarowy. Dzięki dużej wartości prądu i napięcia oraz mobilności, generator umożliwia badanie rzeczywistej wytrzymałości na skutki doziemnego wyładowania piorunowego w dowolnym obiekcie, a zakres możliwych do przeprowadzenia badań nie jest ograniczony tylko do prądu ani tylko do napięcia. Dodatkowo stanowisko badawcze

zaprojektowano tak, aby umożliwić testy wstępne o charakterze nieniszczącym.

Parametry szczegółowe generatora:

- maksymalny prąd impulsowy 200 kA, 10/350 μ s;
- znamionowe napięcie ładowania kondensatorów 120 kV;
- układ pracy tzw. crowbar;
- możliwość synchronizacji udaru z siecią AC 230 V 50 Hz;
- możliwość rekonfiguracji generatora do pracy z prądem wyładowczym 8/20 μ s;
- wbudowana funkcja pre-trigger umożliwiająca przeprowadzenie tzw. testu wstępnego udarem napięciowym do 200 kV o czasie czoła do 10 μ s;
- mobilny zestaw badawczy umożliwia prowadzenie badań w warunkach poligonowych, elementy generatora umieszczone są na platformie, którą można przetaczać przy pomocy wózka widłowego;
- całkowite wymiary generatora 5 m x 4,4 m;
- generator posiada niezależne źródło zasilania niezbędne do naładowania go w warunkach poligonowych;
- pneumatyczne sterowanie generatorem z poziomu programu komputerowego;
- układ ładowania kondensatorów z wykorzystaniem transformatora WN;
- wbudowany w pełni izolowany układ do pomiaru prądu i napięcia wyjściowego generatora;
- pełna izolacja galwaniczna generatora od pulpitu sterującego;
- sygnalizacja optyczna i akustyczna stanu pracy generatora.

Oferta badawcza laboratorium

Infrastruktura, którą dysponuje laboratorium techniki wysokich napięć i narażeń piorunowych Politechniki Białostockiej umożliwia prowadzenie badań naukowych i prac rozwojowych o tematyce obejmującej w szczególności:

- badania laboratoryjne i terenowe różnorodnych zjawisk elektromagnetycznych zachodzących:
 - w urządzeniach piorunochronnych;
 - w elementach konstrukcji budowlanych;
 - wewnątrz konstrukcji budowlanych;
 - w systemach elektrycznych i elektronicznych;
- badania zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w układach uzziemień, ocena:
 - właściwości udarowych uzziemień;
 - poziomów napięć rażeniowych;
- badania i ocena skuteczności działania innowacyjnych rozwiązań w zakresie ochrony odgromowej i przed przepięciami.

W ramach posiadanego zaplecza aparaturowego laboratorium świadczy też kompleksowe usługi badawcze:

1) Badania stosowane:

- badania odporności i wytrzymałości urządzeń elektrycznych i elektronicznych na przepięcia (surge);
- badania wytrzymałości urządzeń elektrycznych i elektronicznych narażonych na skutki przepływu prądu piorunowego;
- badania propagacji udarów piorunowych w instalacjach elektrycznych;
- badanie oddziaływania impulsowych pól elektromagnetycznych (LEPM) na instalacje i aparaturę;
- badania symulacyjne zagrożeń piorunowych urządzeń i systemów elektronicznych w obiektach budowlanych, w stacjach elektroenergetycznych, w obiektach przemysłowych oraz tele- i radiokomunikacyjnych;
- badania wytrzymałości elementów konstrukcyjnych na skutki przepływu prądu udarowego o wartości szczytowej do 200 kA;

2) Pomiary diagnostyka, ekspertyzy:

- rejestracja przepięć w instalacjach elektrycznych oraz w obwodach sygnałowych;
- dobór rozwiązań urządzeń piorunochronnych i systemów ograniczania przepięć w instalacjach elektrycznych i obwodach sygnałowych;
- pomiary pól elektromagnetycznych oraz ochrona urządzeń przed ich oddziaływaniem, ekranowanie;
- generacja prądów piorunowych w warunkach laboratoryjnych i poligonowych (generator mobilny);
- badania wytrzymałości elementów urządzeń piorunochronnych na przepływ prądu piorunowego;
- badania ograniczników przepięć w obwodach niskiego napięcia;
- testowanie odporności udarowej urządzeń elektrycznych i elektronicznych;
- prace eksperckie w zakresie ochrony odgromowej i przed przepięciami;

3) Szkolenia i warsztaty:

- szkolenia z zakresu ochrony odgromowej i przeciwprzepięciowej;
- szkolenia z zakresu ochrony odgromowej i przeciwprzepięciowej w strefach zagrożonych wybuchem;
- warsztaty z zakresu przeciwdziałania skutkom bezpośrednich i pośrednich wyładowań piorunowych oraz przepięć, powodujących uszkodzenia lub nieprawidłowe działanie urządzeń i systemów.

Oferta laboratorium nie jest ograniczona do wymienionej tematyki. Przedmiot, zakres i szczegóły realizacji badań pozostają do indywidualnego ustalenia.

Laboratorium mieści się w budynku Centrum Badawczo-Dydaktycznego Wydziału Elektrycznego, ul. Zwierzyniecka 10, 15-351 Białystok. Osobą odpowiedzialną merytorycznie jest dr inż. Jarosław Wiater, jaroslaw.wiater@pb.edu.pl.

Artykuł powstał i został sfinansowany w ramach projektu Polska Sieć Laboratoriów EMC (EMC-LabNet), umowa nr POIR.04.02.00-02-A007/16-00.

Politechnika Wroclawska – Lider,
OBR Centrum Techniki Morskiej S.A.,
Politechnika Bialostocka,
Politechnika Rzeszowska,
Wojskowa Akademia Techniczna
realizują projekt dofinansowany
z Funduszy Europejskich
Polska Sieć Laboratoriów EMC (EMC-
LabNet)

Celem projektu jest uzupełnienie i rozbudowa infrastruktury badawczej konsorcjantów i utworzenie strategicznej i unikatowej w skali kraju i Unii Europejskiej sieci wyspecjalizowanych laboratoriów EMC.

Dofinansowanie projektu z UE: 40 000 000,00 PLN

Fundusze Europejskie
Inteligentny Rozwój

Rzeczpospolita
Polska

Unia Europejska
Europejski Fundusz
Rozwoju Regionalnego

www.mapadotacji.gov.pl

Autorzy: dr inż. Wojciech Trzasko, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, e-mail: w.trzasko@pb.edu.pl; dr inż. Jarosław Wiater, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, e-mail: jaroslaw.wiater@pb.edu.pl; dr hab. inż. Renata Markowska, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, ul. Wiejska 45d, 15-351 Białystok, e-mail: r.markowska@pb.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Kuramoto S., Salo M., Ohta M., Surge Current and Voltage Distribution in a Reinforced Concrete Building Cause by Direct Lightning Stroke; International Symposium on EMC, Cherry Hill, August 1991
- [2] Tominaga T., Kuwabara N., Kato J., Ramli A., Halim A., Ahmad H., Characteristics of Lightning Surges Induced in Telecommunication Center in Tropical Area; *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, (2003) vol. 45, no. 1, 82–91
- [3] Bejleri M., Rakov A., Uman M., Rambo K.J., Mata C.T., Fernandez M.I., Triggering Lightning Testing of fan Airport Runway Lighting System; *IEEE Trans. on EMC*, (2004) vol.46, no 1
- [4] Rakov V. A., Uman M. A., Fernandez M. I., Mata C. T., Rambo K. J., Stapleton M. V., Sutil R. R., Direct Lightning Strikes to the Lightning Protective System of a Residential Building: Triggered-Lightning Experiments; *IEEE Transactions on Power Delivery*, (2002) vol. 17, no. 2, 575–586
- [5] Barbosa C.F., Nallin F.E., Person S., Zeddani A., Current distribution in a telecommunication tower struck by rocket-triggered lightning; IX SIPDA, International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguacu, Brazil, 2007
- [6] Diendorfer G., Hadrian W., Jobst R., Simulation von Direkten Blitzeinschlägen in den Funkmast von Hochspannungsschaltanlagen: Praktische Durchführung der Messungen; Proc. of the 18th International Conference on Lightning Protection, Munich, Germany, Sept. 1985, 171–174
- [7] Bandinelli M., Bessi F., Chiti S., Infantino M., Pomponi R., Numerical Modeling for LEMP Effect Evaluation Inside a Telecommunication Exchange; *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, (1996) vol. 38, no. 3, 265–273
- [8] Miranda G. C., Paulino J. O. S., Boaventura W. C., Pissolato Filho J., Experimental Study of Lightning Current Distribution in a Telecommunication System; Proc. of the 22nd International Conference on Lightning Protection, Budapest, Hungary, 1994, R 4-10
- [9] Zou J., Lee J., Ji L., Chang S., Zhang B., He J., Transient Simulation Model for a Lightning Protection System Using the Approach of a Coupled Transmission Line Network; *IEEE Trans. on EMC*, (2007) vol. 49, 614-622
- [10] Hashmi M., Lehtonen M., Hanninen S., Modelling and Analysis of Lightning Overvoltage Protection of MV Cable Laterals Connected with Overhead Lines; *Elektronika ir Elektrotehnika*, (2012) no. 7, 49–52
- [11] Sato T., Yanagawa S., Kurita H., An Example of Investigation in Lightning Damage on micro-radio steel tower station and Proposal of Countermeasures; Proc. of the 28th International Conference on Lightning Protection, Kanazawa, Japan, September 2006, 1389–1394
- [12] Sowa A., Analiza zagrożenia piorunowego urządzeń elektronicznych; Rozprawy Naukowe nr 2; Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1990
- [13] Markowska R., Sowa A., Wiater J., Badania zagrożenia piorunowego wybranych układów elektronicznych systemów kontrolno-pomiarowych, *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, Vol. 56, nr 2 (2010), 106–109.
- [14] Markowska R., Sowa A. W., Wiater J. M., Symulacyjne badania zagrożeń piorunowych systemów elektronicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 3/2010, 146–149
- [15] Markowska R., Augustyniak L., Sowa A., Wiater J., Badania zagrożeń piorunowych systemów elektronicznych, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, Nr 24, Wydawnictwo Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008, 89–94.
- [16] Augustyniak L. K., Analiza przepięć atmosferycznych w sieciach komputerowych w obiektach budowlanych; Rozprawa Doktorska, Politechnika Białostocka Wydział Elektryczny; Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1998
- [17] Markowska R., Analiza zagrożenia piorunowego urządzeń w obiektach radiokomunikacyjnych; Rozprawa Doktorska, Politechnika Białostocka Wydział Elektryczny; Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2006
- [18] CDEGS Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, Canada, 2000
- [19] Wiater J. M., Analiza zagrożenia piorunowego systemów sterowania i nadzoru stacji elektroenergetycznych; Rozprawa Doktorska, Politechnika Białostocka Wydział Elektryczny; Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2009
- [20] Masłowski G., Analiza i modelowanie wyładowań atmosferycznych na potrzeby ochrony przed przepięciami; Rozprawy, Monografie – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; AGH, Kraków 2010
- [21] Kordi B., Moini R., Janischewskij W., Hussein A. M., Shostak V. O., Rakov V. A., Application of the antenna theory model to a tall tower struck by lightning; *Journal of Geophysical Research*, 4542 (2003) vol. 108, no. D.17, ACL 7-1–7-9
- [22] Aniserowicz K., Analiza zagadnień kompatybilności elektromagnetycznej w rozległych obiektach narażonych na wyładowania atmosferyczne; Rozprawy Naukowe – Politechnika Białostocka nr 122; Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2005
- [23] Maksimowicz T., Aniserowicz K., Investigation of models of grid-like shields subjected to lightning electromagnetic field: experiments in the frequency domain; *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 54 (4), (2012), 826-836
- [24] Maksimowicz T., Aniserowicz K., Simulation of currents induced in a loop by lightning strike of different waveforms; *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (3), (2010), 43-44
- [25] Aniserowicz K., Burak-Romanowski R., Michna S., Woźniak K., Zielenkiewicz M., Warystory w akcji – Poligonowe badania skuteczności działania systemu ograniczania przepięć wykorzystującego warystory; *Infrator - Biuletyn informacyjny PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.*, LVI (2), (2011), 10-13
- [26] Markowska R., Sowa A., Ochrona odgromowa obiektów radiokomunikacyjnych; Rozprawy Naukowe – Politechnika Białostocka nr 253; Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2013
- [27] Markowska R., Badania modelowe właściwości statycznych i udarowych uziomu słupa elektroenergetycznego przy różnych gruntach; *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 94 (2018), nr 10, 65-68; doi:10.15199/48.2018.10.15
- [28] Markowska R., Wiater J., Step and Touch Voltage Distributions at GSM Base Station during Direct Lightning Stroke; XIII International Conference on Electromagnetic Disturbances, Białystok, Poland, 24–26 September 2003, 7.2-1–7.2-4
- [29] Markowska R., Induced and ground potential voltage components in analysis of separation distance for lightning protection in buildings, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 92 (2016), nr 12, 265–270; doi:10.15199/48.2016.12.67
- [30] Markowska R., Wróbel Z., Selected issues of safe operation of the railway traffic control system in the event of exposition to damage caused by lightning discharges; *Energies*; September Vol. 14 (2021), No. 18, 5808; 1-27; doi: 10.3390/en14185808; url: <https://doi.org/10.3390/en14185808>
- [31] Wiater, J. M., Skuteczność ochrony przeciwprzebieciowej w sieciach elektroenergetycznych z równoległymi łączonymi warystorowymi ogranicznikami przepięć; *Wiadomości Elektrotechniczne*, 88(6), 5–8. <http://doi.org/10.15199/74.2020.6.1>
- [32] Wiater, J. M., Surge Immunity of LV Miniature Circuit Breakers During Lightning Ground Discharges; *Automatyka, elektryka, zakłócenia*, 11(3), 24–27. <http://doi.org/10.17274/AEZ.2020.41.02>
- [33] PN-EN 62305-1:2011, Protection against lightning – Part 1: General Principles; IEC Standards Publication
- [34] PN-EN 62305-2:2012, Protection against lightning – Part 2: Risk management; IEC Standards Publication
- [35] PN-EN 62305-3:2011, Protection against lightning – Part 3: Physical damage to structures and life hazard; IEC Standards Publication
- [36] PN-EN 62305-4:2011, Protection against lightning – Part 4: Electrical and electronic systems within structures; IEC Standards Publication