



SYMULACYJNE BADANIA ZAGROŻEŃ PIORUNOWYCH W SYSTEMACH CHRONIONYCH KATODOWO

SIMULATION MEASUREMENTS ON LIGHTNING THREAT IN CATHODIC PROTECTION SYSTEMS

Andrzej Sowa¹⁾, Mikołaj Kościuk²⁾

¹⁾ Politechnika Białostocka

²⁾ EuRoPol GAZ s.a.

Słowo kluczowe: ochrona katodowa, ochrona odgromowa, badania zagrożeń
Keywords: corrosion, cathodic protection system, lightning protection

Streszczenie

Zapewnienie kompleksowej ochrony urządzeń i systemów przed narażeniami piorunowymi wymaga przeanalizowania występującego zagrożenia oraz dobrania odpowiednich sposobów ochrony. Podstawowe informacje o zagrożeniu wywołanym przez rozpryskujący się prąd piorunowy oraz możliwościach środków ochrony odgromowej można uzyskać prowadząc symulacyjne badania terenowe oraz pomiary laboratoryjne. Zasady prowadzenia badań symulacyjnych przedstawione zostaną na przykładzie systemów ochrony katodowej w zespołach zaworowo-upustowych. Wyniki badań symulacyjnych można wykorzystać do tworzenia modeli matematycznych zjawisk zachodzące podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w obiekty, w których zainstalowano systemy elektroniczne.

Summary

Undisturbed operation of electronic equipment and systems requires complex analysis of lightning threats and careful selection of proper protection measures. Basic information on lightning threats resulting from surge current flows is possible to obtain from experimental simulation research in actual objects with cathodic protection systems exposed to lightning. The information obtained this way was then used for creating mathematical models of the phenomena observed during these experiments. Comparisons of measurement and calculation results allowed for developing of proper numerical representations of the analyzed objects, which then were used for creating mathematical models of various phenomena that may occur in these objects during natural lightning strikes.

1. Wstęp

Od kilkudziesięciu lat podejmowane są próby oceny zagrożeń systemów elektrycznych i elektronicznych występujących podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w różnorodne obiekty budowlane. Podstawowym źródłem informacji o zachodzących zjawiskach są wyniki rejestracji prowadzonych w rzeczywistych obiektach podczas:

- bezpośrednich, naturalnych lub prowokowanych wyładowań piorunowych w te obiekty,
- symulacyjnych badań terenowych polegających na wymuszaniu przepływu prądów uderowych w instalacjach piorunochronnych lub przewodzących elementach konstrukcyjnych obiektów.

Względy techniczne i ekonomiczne ograniczają możliwości stosowania pierwszej z przedstawionych metod tylko do obszarów o bardzo dużej aktywności burzowej. Obecnie podstawowym źródłem informacji o zagrożeniu piorunowym są wyniki symulacyjnych badań terenowych. Dotychczas wyniki takich badań, po wykonaniu prostych przeliczeń uwzględniających rzeczywiste parametry prądów piorunowych (przeskalowania), wykorzystywano do przybliżonej oceny:

- różnic potencjałów pomiędzy przewodzącymi elementami konstrukcji i instalacji obiektów wywołanych przez rozprzyskający się prąd piorunowy,
- poziomów napięć i prądów indukowanych w instalacji elektrycznej i obwodach sygnałowych,

Przedstawiony sposób postępowania służący ocenie zagrożenia piorunowego jest bardzo niedokładny a otrzymanych wyników nie można wykorzystywać do analizy innego rodzaju obiektów oraz porównywania różnych rozwiązań ochrony odgromowej.

Rozwiązaniem, umożliwiającym dokładniejszą ocenę zagrożenia piorunowego systemów elektrycznych jest podjęta próba wykorzystania wyników symulacyjnych badań terenowych, które są prowadzone podczas normalnej pracy systemów w badanych obiektach, do opracowania modeli matematycznych opisujących zjawiska zachodzące podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w obiekty budowlane. Stworzone modele można następnie wykorzystać do określania zagrożeń wywołanych przez rozprzyskający się prąd piorunowy o różnych kształtach i wartościach szczytowych oraz do oceny właściwości ochronnych różnorodnych rozwiązań urządzeń piorunochronnych. Taki tok postępowania zaproponowano do oceny zagrożeń piorunowych systemów ochrony katodowej w zespołach zaworowo-upustowych.

2. Prądy uderowe stosowane w badaniach zagrożeń piorunowych

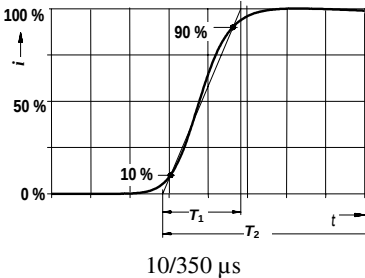
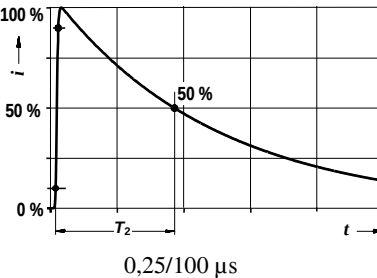
Przeprowadzenie oceny zagrożenia piorunowego urządzeń i systemów elektrycznych i elektronicznych wymaga posiadania podstawowych informacji o następujących wartościach charakteryzujących prąd piorunowy wyładowania doziemnego:

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------|
| - wartości szczytowej | I_m |
| - maksymalnej stromości narastania | $S_{\max} = (di_p/dt)_{\max}$ |
| - ładunku przenieszonego przez prąd | $Q_{\text{imp}} = \int i_p dt$ |
| - energia właściwa | $W/R = \int i_p^2 dt$ |

W niektórych przypadkach należy uwzględnić również parametry uzupełniające, do których należą czasy trwania czoła i do półszczytu na grzbiecie fali prądu piorunowego oraz liczba udarów prądowych w wyładowaniu wielokrotnym.

Różnorodność typów wyładowań, rozkładów ładunków w chmurze i w kanale wyładowania powoduje, że dostępne dane wykorzystywane są do wykreślania rozkładów statystycznych wartości powyższych parametrów. Istnieje również możliwość przyjęcia wartości parametrów charakteryzujących prąd piorunowy w zależności od przewidywanego poziomu ochrony. Zalecane wartości, w przypadku czterech poziomów ochrony odgromowej, zestawiono w tabeli 1.

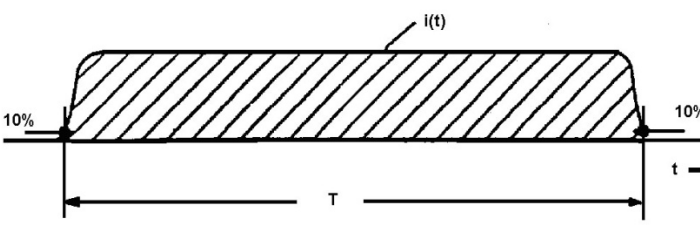
Tab. 1. Wartości podstawowych parametrów charakteryzujących prądy piorunowe wyładowań doziemnych

Parametry charakteryzujące prąd piorunowy	Pierwsza składowa			Kolejna składowa		
	Poziom ochrony			Poziom ochrony		
	I	II	III i IV	I	II	III i IV
Wartości szczytowe [kA]	200	150	100	50	37,5	25
Stromość narastania [kA/μs]	20	15	10	200	150	100
Kształt [T_1/T_2]						
Energia właściwa [MJ/Ω]	10	5,6	2,5	--	--	--

W wielokrotnym doziemnym wyładowaniu piorunowym występuje również składowa długotrwała, którą charakteryzuje czas trwania T_{long} mierzony na poziomie 10% wartości maksymalnej oraz ładunek całkowity Q_{long} . Typowe wartości charakteryzujące długotrwałą składową prądu piorunowego zestawiono w tabeli 2.

Na działanie prądów udarowych o przedstawionych wartościach szczytowych i kształtach narażone są urządzenia lub elementy konstrukcji obiektu, w które może nastąpić bezpośrednie wyładowanie lub znajdują się w obwodach przepływu prądów piorunowych.

Tab. 2. Wartości podstawowych parametrów charakteryzujących prąd piorunowy długotrwałej składowej wyładowania piorunowego

Składowa wyładowania	Poziom ochrony	Wartość szczytowa	Kształt	Ładunek udaru długotrwałego
Długotrwała składowa prądu	I	400A	Czas trwania 0,5 s	200 C
	II	300A		150 C
	III i IV	200A		100 C
				

Przebieg czasowy długotrwałej składowej prądu piorunowego

Wymagania zapewnienia pewnej ochrony odgromowej obiektów budowlanych oraz niezawodnego ograniczania napięć i prądów udarowych w sieciach rozdzielnych niskiego napięcia oraz systemach przesyłu sygnałów powodują wzrost znaczenia badań laboratoryjnych i terenowych symulujących narażenia piorunowe. W prowadzonych badaniach podstawową sprawą jest wytworzenie prądów udarowych o określonych wartościach szczytowych oraz kształtach. W normach ochrony odgromowej [1, 2, 3] przedstawiono propozycje schematów zastępczych obwodów generatorów wykorzystywanych do symulacji zagrożeń stwarzanych przez prądy udarowe.

3. Badania urządzeń ograniczających przepięcia

W instalacji elektrycznej do ochrony przed oddziaływaniem rozprzyskającego się prądu piorunowego stosowane są urządzenia do ograniczania przepięć SPD (Surge protective Device) typu 1. Właściwości SPD typu 1 określane są na podstawie wyników badań ich odporności na działanie prądów udarowych „impulsowych”, które scharakteryzowano, następującymi parametrami:

- wartością szczytową I_{imp} (kA),
- przenoszonym ładunkiem Q (As),
- energią właściwą W/R (kJ/Ω),
- czasem do osiągnięcia I_{imp} oraz wymaganych wartości Q i W/R
- t_{limp} (μs), $t_{Q W/R}$ (ms),

Zalecane wartości podstawowych parametrów charakteryzujących prąd impulsowy zestawiono tabeli 3.

Tab. 3. Podstawowe parametry charakteryzujące prądy impulsowe stosowane do badań SPD typu 1

I_{imp} (kA)	Q (As) w 10 ms	W/R (kJ/ Ω) w 10 ms
20	10	100
10	5	25
5	2,5	6,25
2	1	1
1	0,5	0,25

W normie PN EN 61643-11 przedstawiające zakresy badań SPD nie określono kształtu prądowego udaru probierczego. Pojawiają się jedynie sugestie o możliwości zastosowania prądu udarowego 10/350 wykorzystywanego do symulacji narażeń piorunowych. W przypadku stosowania prądu udarowego o innym kształcie wymagane jest ograniczenie czasu jego narastania poniżej 50 μ s.

Zestawienie zakresu badań SPD stosowanych w systemach przesyłu sygnałów do ograniczania przepięć atmosferycznych i ochrony przyłączy sygnałowych przed oddziaływaniem części prądu piorunowego zestawiono w tabeli 4.

4. Badania iskierników izolacyjnych

Próbowi odporności na działanie prądów piorunowych powinny być również poddane iskierniki izolacyjne wykorzystywane do połączeń wyrównawczych w systemach ochrony katodowej. W zaleceniach określających kształt udarów probierczych uwzględniono zróżnicowane zagrożenie piorunowe iskierników wprowadzając możliwości badań prądami udarowymi o wartościach szczytowych od 5 kA do 100kA (tabela 5.).

Tab. 4. Zakres badań SPD stosowanych do ochrony przed oddziaływaniem części prądu piorunowego

Kategoria	Typ testu	Napięcie w obwodzie otwartym	Prąd płynący po zwarcu
D1 D2	Dużej energii	≥ 1 kV ≥ 1 kV	0,5 kA, 1 kA lub 2,5 kA, kształt 10/350 1 kA, 2,5 kA, kształt 10/250

Tab. 5. Wartości podstawowych parametrów charakteryzujących prądy udarowe stosowane do badania iskierników izolacyjnych

Klasyfikacja	I_{max}	Q	W/R	T_1	t_d
H	100 kA $\pm$ 10%	50 As $\pm$ 10%	2,5MJ/ Ω $\pm$ 20%	≤ 50 μ s	≤ 2 ms
N	50 kA $\pm$ 10%	25 As $\pm$ 10%	0,63MJ/ Ω $\pm$ 20%	≤ 50 μ s	≤ 2 ms
1L	25 kA $\pm$ 10%	12,5 As $\pm$ 10%	0,16MJ/ Ω $\pm$ 20%	≤ 50 μ s	≤ 2 ms
2L	10 kA $\pm$ 10%	5 As $\pm$ 10%	25 kJ/ Ω $\pm$ 20%	≤ 50 μ s	≤ 2 ms
3L	5 kA $\pm$ 10%	2,5 As $\pm$ 10%	6,3 kJ/ Ω $\pm$ 20%	≤ 50 μ s	≤ 2 ms

5. Symulacyjne badania terenowe

Przedstawioną poniżej metodę symulacyjnych badań terenowych zastosowano dotychczas w kraju do badania zagrożenia piorunowego urządzeń i systemów elektrycznych i elektronicznych zainstalowanych w:

- dwupiętrowym obiekcie budowlanym (badano zagrożenie piorunowe systemów telekomunikacyjnych),
- stacjach bazowych telefonii komórkowej,
- stacjach elektroenergetycznych wysokiego napięcia (badano zagrożenie systemów telemekhaniki).

Opracowaną metodę badań można również zastosować do określania zagrożenia piorunowego i doboru odpowiednich środków ochrony aparatury kontrolno-pomiarowej w zespołach zaworowo-upustowych, ze szczególnym uwzględnieniem ochrony katodowej

Wybór takich obiektów do badań symulacyjnych wynikał z faktu ich zwiększonego zagrożenia piorunowego wynikającego z zastosowania wysokich wież do łączności radiowej (fot. 1.)

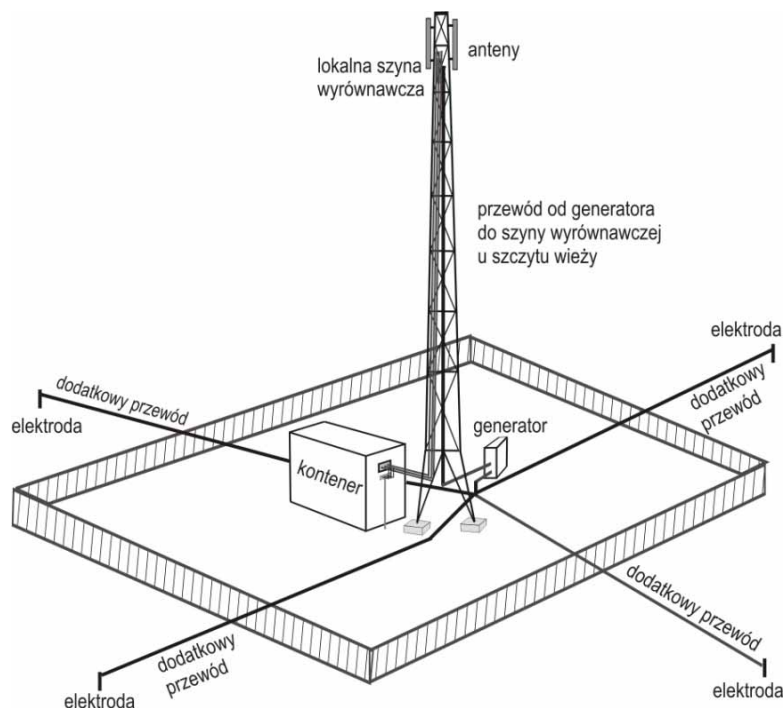


Fot. 1. Widok ogólny zespołów zaworowo-upustowych

W badaniach terenowych prowadzonych w tego rodzaju obiektach prąd udarowy z generatora należy doprowadzić do szczytu wieży, zapewnić jego rozpływ w konstrukcji wieży, a następnie w systemie uziomowym oraz wyrównywania potencjałów (rys. 1).

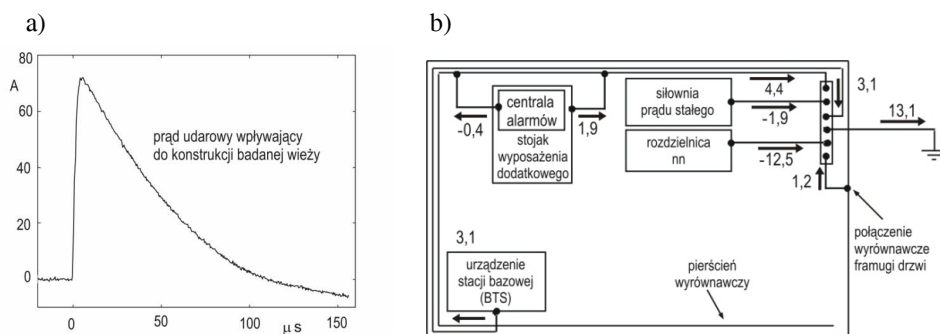
Do zamknięcia obwodu prądowego wykorzystywane są dodatkowe przewody powrotne łączące generator z uziemionym ogrodzeniem lub dodatkowymi elektrodami wbitymi w ziemię w pewnej odległości od stacji. Pomiary można prowadzić nie przerywając normalnej pracy zespołu zaworowo-upustowego. Ze względu na zastosowaną drogę prądu udarowego

z generatora na szczyt wieży (prąd płynie równoległe do konstrukcji wieży), nie są możliwe badania efektów sprzężeń indukcyjnych powodowanych prądem rozptylającym się w wieży (prąd płynący w dół).



Rys. 1. Symulacyjne badania terenowe w obiekcie wieża-kontener

Przykładowe wyniki pomiarów rozptyłu prądów udarowych w elementach systemu wyrównywania potencjałów oraz przewodach wewnątrz kontenera stacji bazowej GSM przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Symulacyjne badania terenowe zagrożenia piorunowego; a) prąd wprowadzany do konstrukcji wieży, b) podział prądu udarowego w przewodach wewnątrz kontenera (wartości szczytowe prądów wyrażono w procentach prądu wprowadzanego do wieży)

Uwzględniając uwarunkowania, jakie występują podczas pomiarów (ograniczone wartości prądów udarowych, konieczność pomiarów w pracujących obiektach), opracowano tok postępowania pozwalający na określenie zagrożeń piorunowych wybranych systemów kontrolno-pomiarowych w różnych obiektach budowlanych na podstawie wyników symulacyjnych badań terenowych.

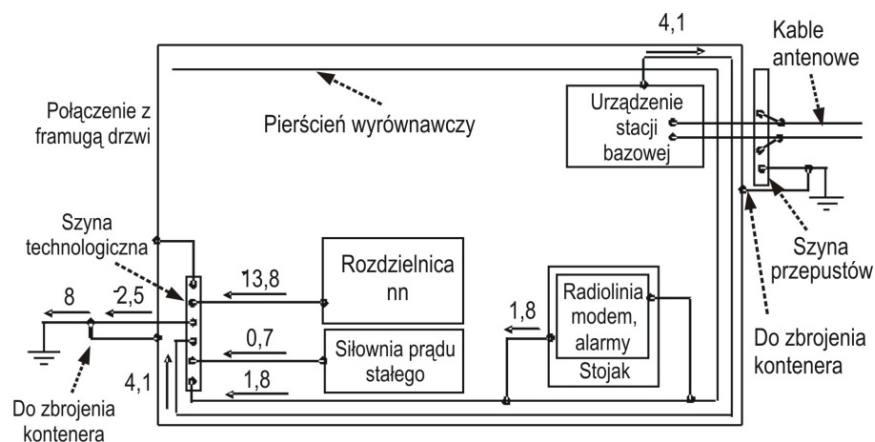
Opracowana procedura obejmuje następujące działania:

- Wymuszenie przepływu prądu udarowego w przewodzących elementach konstrukcyjnych rzeczywistego obiektu.
- Prowadzenie rejestracji prądów i napięć wywołanych przez rozpryskujący się prąd udarowy.
- Utworzenie modeli matematycznych opisujących zjawiska zachodzące w czasie pomiarów.
- Wykonanie obliczeń i wybranie modelu matematycznego, który zapewni otrzymanie wyników najbardziej zbliżonych do tych, jakie zarejestrowano w czasie pomiarów.
- Wykorzystanie wybranego modelu do symulacji zjawisk zachodzących podczas wyładowania piorunowego w rozważany obiekt.
- Przeprowadzenie obliczeń i dokonanie oceny występującego zagrożenia piorunowego.

Do analiz matematycznych program HIFREQ [4], który ma największe możliwości modelowania różnorodnych zjawisk elektromagnetycznych oraz umożliwia równoczesne uwzględnienie elementów nadziemnych i zakopanych. Możliwe jest również przeprowadzenie analiz w szerokim zakresie częstotliwości, od prądu stałego do kilkudziesięciu megaherców. Program umożliwia wykonanie obliczeń:

- wzrostów potencjałów uziomów oraz połączonych z nimi konstrukcji nadziemnych;
- natężeń pól elektromagnetycznych oddziałujących na urządzenia badanych systemów w analizowanych obiektach;
- prądów i napięć indukowanych w układach przewodów oraz przewodzących elementach konstrukcji obiektów.

Model matematyczny zastosowany w programie HIFREQ uwzględnia sprzężenia rezystancyjne, pojemnościowe, indukcyjne i promieniowane pomiędzy wszystkimi elementami nadziemnymi i zakopanymi reprezentacji cienko-przewodowej analizowanego obiektu. Każdy segment takiej reprezentacji (element cienko-przewodowy) jest opisany matematycznie za pomocą równań Maxwella z uwzględnieniem jego lokalizacji w przestrzeni oraz przekroju i rodzaju materiału. Otrzymany układ równań rozwiązywany jest numerycznie metodą momentów [4]. Przykładowe wyniki obliczeń rozprysku części prądu piorunowego dla obiektu wieża - kontener stacji bazowej GSM przedstawiono na rys. 7.



Rys. 3. Rozpływ części prądu uderowego 100 kA, 10/350 w kontenerze podczas wyładowania piorunowego w wieżę

Podjęte badania są kontynuowane w kierunku poszukiwania bardziej dokładnych, mniej pracochłonnych i czasochłonnych metod określania zagrożenia piorunowego.

6. Wnioski

Wykorzystując przedstawioną metodę analizy zagrożenia piorunowego możliwe jest przeprowadzenie oceny zagrożenia piorunowego systemów ochrony katodowej oraz innych systemów elektronicznych pracujących w zespołach zaworowo-upustowych. Dobierając odpowiednio parametry prądów uderowych można wykonywać pomiary napięć/prądów powstających w różnorodnych systemach kontrolno-pomiarowych analizowanych obiektach bez konieczności przerywania ich pracy. Otrzymane wyniki pomiarów, stanowiące ważne źródło informacji o zjawiskach zachodzących w obiekcie podczas przepływu prądów uderowych, można wykorzystać do tworzenia modeli matematycznych opisujących zagrożenie stwarzane przez prądy wyładowań piorunowych.

Literatura

- [1] PN-EN 62305-1:2008 Ochrona odgromowa – Część 1: Wymagania ogólne.
- [2] PN-EN 62305-2:2009 Ochrona odgromowa – Część 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów budowlanych i zagrożenie życia.
- [3] PN-EN 62305-4:2009 Ochrona odgromowa – Część 4: Urządzenia elektryczne i elektroniczne w obiektach budowlanych.
- [4] „HIFREQ User's Manual: Frequency Domain Analysis of Buried Conductor Networks”; Safe Engineering Services & Technologies Ltd.; Montreal, Canada.