

Seminarium
Postępy w Technice Wysokich Napięć
100. Rocznica Urodzin Profesora Stanisława Szpora
16 maj 2008

BADANIA ZAGROZEŃ PIORUNOWYCH SYSTEMÓW ELEKTRONICZNYCH

Renata MARKOWSKA¹, Leszek AUGUSTYNIAK², Andrzej SOWA³, Jarosław WIATER⁴

Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, tel. 085 746 94 44

1. remark@pb.edu.pl, 2. laugust@pb.edu.pl, 3. andrzej.sowa@ochrona.net.pl, 4. jaroslawwiater@we.pb.edu.pl

Streszczenie: Od kilkudziesięciu lat podejmowane są próby oceny zagrożeń piorunowych urządzeń elektrycznych i elektronicznych. W prowadzonych badaniach szczególna uwaga jest zwrócona na zjawiska zachodzące podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w różnorodne obiekty budowlane, w których pracują systemy elektroniczne. W takich przypadkach do wyznaczenia występujących zagrożeń piorunowych można zastosować kompleksową metodę analizy zachodzących zjawisk. Podstawę tej metody stanowią badania symulacyjne prowadzone w rzeczywistych obiektach. Wyniki badań terenowych wykorzystano przy tworzeniu modeli matematycznych oddziaływania prądów piorunowych na systemy elektroniczne.

Słowa kluczowe: ochrona odgromowa, przepięcia atmosferyczne, zagrożenie piorunowe

1. WSTĘP

Od kilkudziesięciu lat podejmowane są próby oceny zagrożenia występującego 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,
- wymuszonego przepływu prądów udarowych w instalacjach piorunochronnych lub przewodzących elementach konstrukcyjnych obiektów.

Względy techniczne i ekonomiczne spowodowały rozwój drugiej z przedstawionych metod. Wyniki prowadzonych badań są najczęściej wykorzystywane do wstępnej oceny:

- różnic potencjałów oraz poziomów napięć indukowanych w instalacjach wewnątrz obiektów budowlanych.
- skuteczności ekranowania konstrukcji budynku przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym,
- różnorodnych rozwiązań wykorzystywanych do odprowadzania prądów piorunowych.

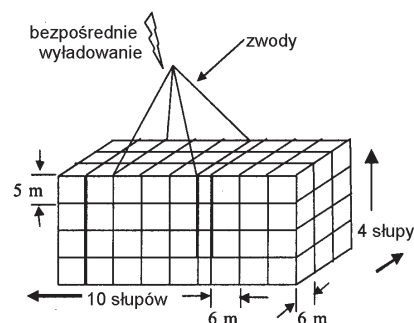
Badania można prowadzić zarówno podczas budowy obiektu, jak i w obiektach już istniejących, w których zainstalowano urządzenia i systemy elektryczne i elektroniczne.

Uzupełniającą informacji dostarczają wyniki badań laboratoryjnych symulujących na modelach obiektów budowlanych zjawiska zachodzące podczas wyładowań piorunowych.

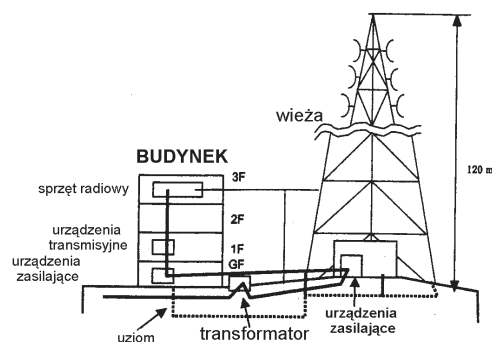
2. BADANIA ZAGROZEŃ WYWOŁANYCH PRZEZ PRZEPIĘTY PRĄD PIORUNOWEGO

Dotychczas tylko w kilku obiektach budowlanych rejestrowano przepięcia powstające w instalacjach niskonapięciowych oraz prądy płynące w elementach konstrukcyjnych podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w te obiekty. Przykładowo, takie rejestracje prowadzono w dużym budynku telekomunikacyjnym (rys.1a) oraz w znacznie mniejszym obiekcie budowlanym obok wysokiej wieży (rys.1b.).

a)



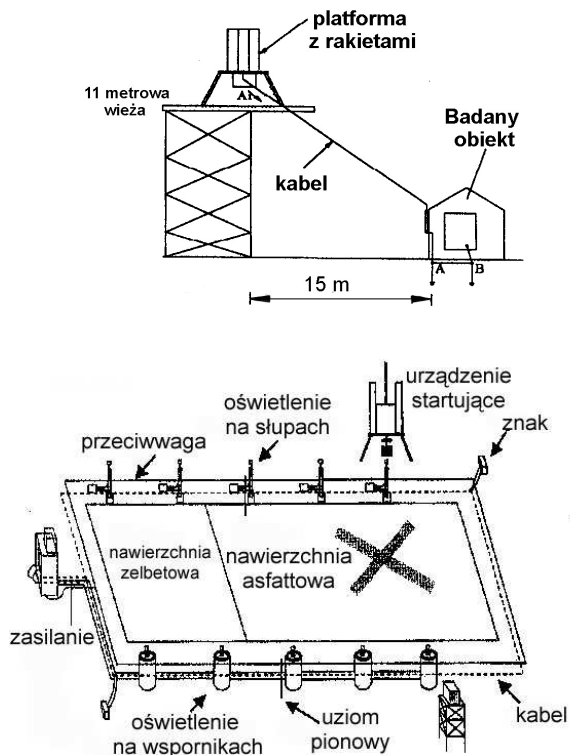
b)



Rys. 1. Przykłady obiektów, w których badano zagrożenia powstające podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych [4, 9]

Otrzymane wyniki są najczęściej wykorzystywane do tworzenia prostych modeli matematycznych zjawisk zachodzących podczas doziemnych wyładowań piorunowych w obiekty budowlane.

Od kilkudziesięciu lat podejmowane są również próby prowokowania bezpośrednich wyładowań piorunowych w obiekty budowlane. W takich badaniach do rozwijającego się nad obiektem wyładowania piorunowego wyrzucane są niewielkie rakiety ciągnące za sobą przewody i stwarzana jest możliwość doprowadzenia wyładowania w wybrany punkt. Taki sposób badań stosowany jest zarówno do oceny zagrożenia piorunowego rozbudowanych systemów elektrycznych i elektronicznych (np. systemów oświetlenia pasów startowych na lotniskach [2]). Prądy piorunowe doziemnych wyładowań prowokowanych wprowadzano również do elementów urządzeń piorunochronnych oraz systemów uziomowych różnorodnych obiektów budowlanych [3] (rys. 2.)



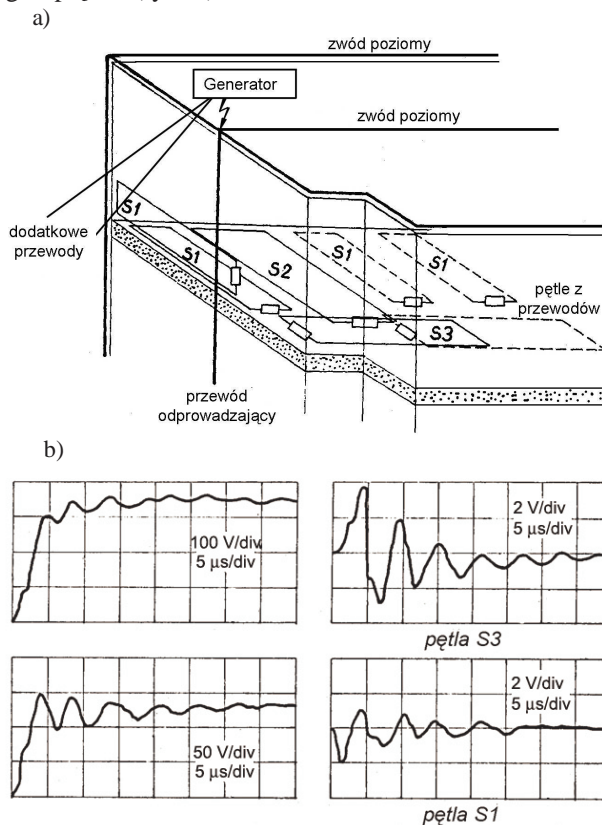
Rys.2. Układy do badań zagrożeń wywołanych przez prowokowane wyładowania piorunowe

3. BADANIA SYMULACYJNE ZAGROŻENIA PIORUNOWEGO

Obserwacje zjawisk zachodzących przy przepływie prądów piorunowych podczas bezpośrednich lub prowokowanych wyładowań naturalnych są czasochłonne i kosztowne, a ich wyniki trudno uogólniać na inne obiekty. Do przybliżonej oceny zagrożenia piorunowego wykorzystuje się uproszczone metody badań, podczas których do instalacji piorunochronnej lub przewodzących elementów konstrukcyjnych wprowadzane są prądy udarowe symulujące prądy piorunowe wpływające do obiektu. Źródłem prądu jest generator udarowy umieszczony na dachu lub obok obiektu. Taki kierunek badań symulacyjnych, połączony z wykorzystywaniem otrzymanych wyników do tworzenia modeli matematycznych przyjęto w Politechnice Białostockiej.

3.1. Badania symulacyjne zagrożenia piorunowego urządzeń elektronicznych

W kraju metodę badań symulacyjnych zastosowano po raz pierwszy do oceny zagrożenia piorunowego urządzeń telekomunikacyjnych pracujących w dwupiętrowym obiekcie budowlanym [7]. Źródłem prądów udarowych był generator umieszczony na dachu obiektu. Przepięcia rejestrowano w pętach tworzonych z przewodów ułożonych na ścianach i na podłodze w pomieszczeniu na 2-gim piętrze (rys.3a)



Rys. 3. Badanie napięć indukowanych w pętach tworzonych z przewodów a) układ połączeń obwodu prądu udarowego oraz rozmieszczenie badanych pętli, b) przebiegi prądów udarowych i napięć indukowanych przez te prądy w pętach

Zastosowany generator prądowy umożliwił wprowadzenie do przewodów urządzenia piorunochronnego prądów udarowych o wartościach szczytowych dochodzących do 330A. Czas czoła otrzymanych udarów wynosił 2-3 μ s, a czas do półszczytu ok. 700 μ s. przykładowe przebiegi prądów udarowych i indukowanych napięć przedstawiono na rys. 3b.

Po przeliczeniu otrzymanych wartości do zagrożenia wywołanego przez prąd piorunowy o wartości szczytowej 100 kA i szybkości narastania 100 kA/ μ s stwierdzono, że:

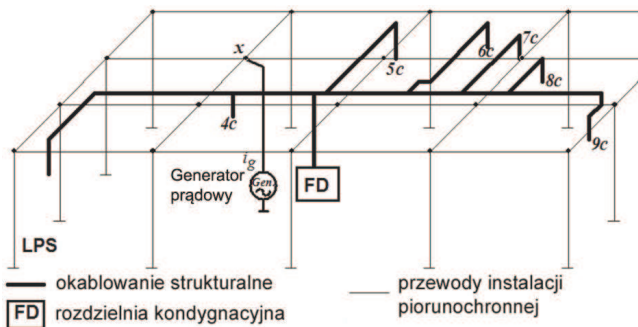
- w każdym z badanych obwodów wartości szczytowe indukowanych napięć przekroczyły 1kV,
- maksymalne wyznaczone wartości nie przekraczały 20kV.

W większości przypadków w badaniach terenowych próbowano odwzorować rozptył prądu, jaki wystąpi podczas bezpośredniego uderzenia piorunu. Innym sposobem podejścia do oceny zagrożenia piorunowego jest wymuszanie przepływu prądu udarowego

w obwodzie różniącym się od tego, jaki wystąpi podczas wyładowania w obiekt. W takim przypadku należy wykonać przedstawione poniżej działania.

- Wymusić przepływ prądu udarowego w przewodzących elementach konstrukcyjnych rzeczywistego obiektu.
- Prowadzić rejestrację prądów i napięć wywołanych przez rozprzyskający się prąd udarowy.
- Utworzyć modele matematyczne opisujące zjawiska zachodzące w czasie pomiarów.
- Wykonać obliczenia i wybrać model matematyczny, który zapewnił otrzymanie wyników najbardziej zbliżonych do tych, jakie zarejestrowano w czasie pomiarów.
- Wykorzystać wybrany model do symulacji zjawisk zachodzących podczas wyładowania piorunowego w analizowany obiekt.
- Przeprowadzić obliczenia i dokonać oceny występującego zagrożenia piorunowego.

Przykład takich badań symulujących zagrożenie piorunowe instalacji elektrycznej i okablowania strukturalnego przedstawiono na rys. 4 [1].

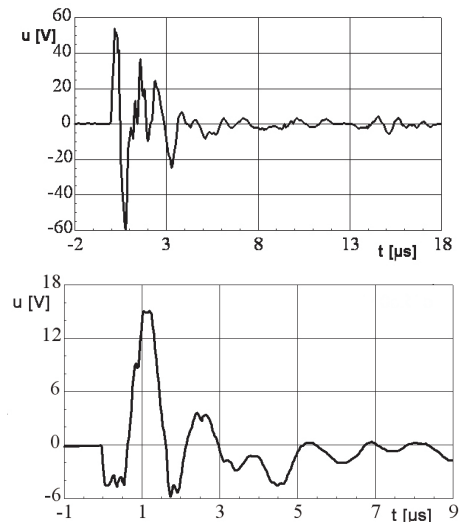


Rys. 4. Układy połączeń do badania przepięć indukowanych przez rozprzyskający się prąd udarowy [1]

Źródłem zakłóceń był prąd udarowy wprowadzany do przewodów urządzenia piorunochronnego z generatora umieszczonego wewnątrz budynku. Prąd płynął w obwodzie: generator - rura aluminiowa – przewody instalacji piorunochronnej – system uzziomienia – generator. Zakłócanymi obwodami była instalacja elektryczna oraz okablowanie lokalnej sieci komputerowej.

Zastosowany generator umożliwił wprowadzenie do przewodów urządzenia piorunochronnego prądów udarowych o wartościach szczytowych dochodzących do 1550 A i czasach czoła ok. 2,5 μ s. Indukowane przepięcia rejestrowano w instalacji elektrycznej typu TN-C-S pomiędzy przewodami fazowymi a neutralnym oraz ochronnym oraz w okablowaniu strukturalnym lokalnej sieci komputerowej (rys. 5).

Wykorzystując wyniki pomiarów opracowano model matematyczny układu kanał wyładowania - badany obiekt budowlany i wyznaczono zagrożenie wywołane przez przepływ prądu udarowego o wartości szczytowej 100 kA. Otrzymane wartości szczytowe indukowanych napięć zawierały się w przedziale od kilkuset woltów do kilkudziesięciu kilowoltów.

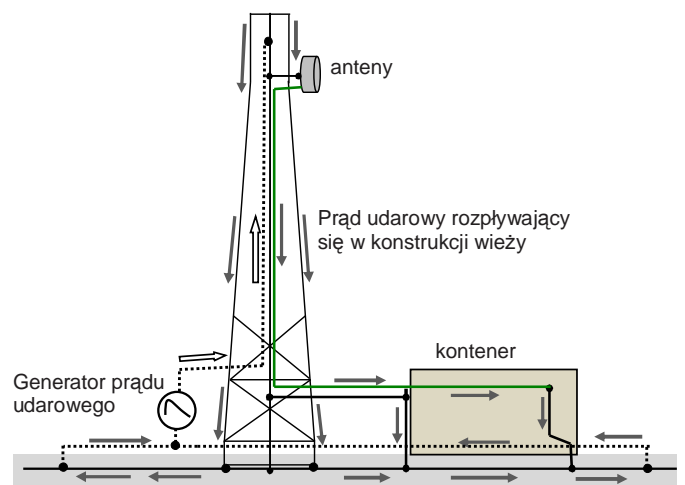


Rys. 5. Przykładowe przebiegi napięć indukowanych w gniazdach sieci komputerowej

Podobne badania przeprowadzono dla przypadków symulacji zagrożeń piorunowych podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w wieże wolnostojących stacji bazowych telefonii komórkowej oraz w zwody na terenie stacji elektroenergetycznych.

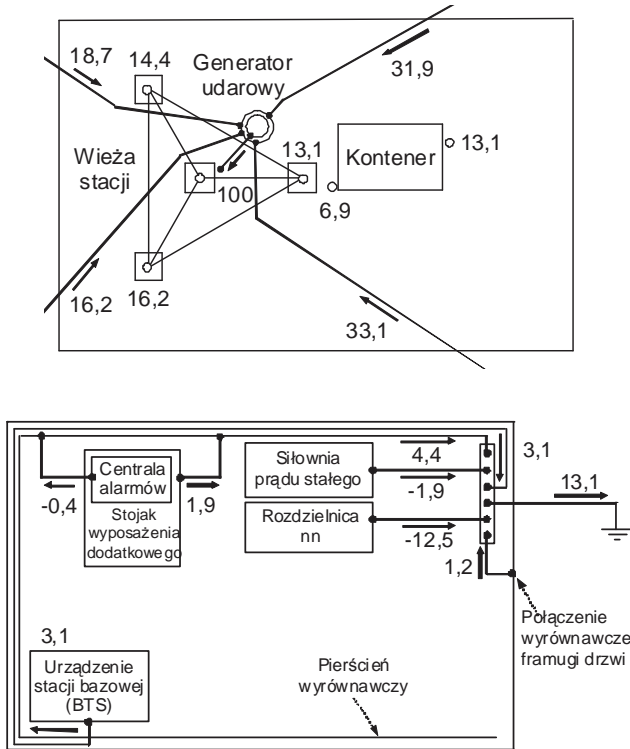
W przypadku stacji bazowych badano zjawiska zachodzące w typowych obiektach składających się z wież antenowych o wysokości 50 m – 60 m i ustawionych obok kontenerów. Z generatora umieszczonego u podstawy wieży prąd udarowy doprowadzano izolowanym przewodem do szczytu wieży. Następnie prąd rozpryskiwał się w elementach przewodzących konstrukcyjnych wieży oraz w systemie wyrównawczym i uziomowym stacji.

Do zamknięcia obwodu prądowego wykorzystano dodatkowe przewody powrotne łączące generator z uziemionym ogrodzeniem lub dodatkowymi elektrodami wbitymi w ziemię w pewnej odległości od stacji (rys. 6). Pomiary prowadzono nie przerywając normalnej pracy stacji bazowych.



Rys. 6. Układ połączeń do badania zagrożeń piorunowych stacji bazowej [5]

Przykładowe wyniki pomiarów rozptyłu prądów udarowych przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Podział prądu udarowego w przewodach systemu pomiarowego i przewodach uziomowych oraz wewnątrz kontenera stacji bazowej (wartości prądu wyrażono w procentach prądu wprowadzanego do konstrukcji wieży)

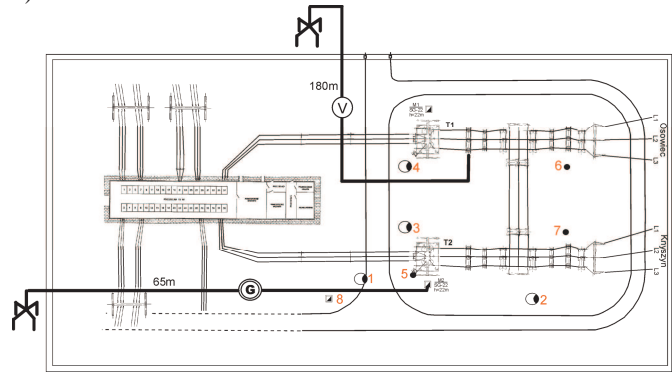
W przypadku stacji elektroenergetycznych, mając na uwadze fakt, iż stacje muszą pracować w czasie prowadzenia pomiarów oraz niemożność dokonywania wyłączeń, rozłączeń i przełączeń w obiekcie zaproponowano inne zasady prowadzenia badań terenowych. Rejestrowano w różnych miejscach wzrost lokalnego potencjału stacji elektroenergetycznej względem ziemi odniesienia. Prąd udarowy doprowadzano do punktów na terenie stacji najbardziej narażonych na bezpośrednie oddziaływanie rzeczywistego wyładowania piorunowego (zwody pionowe, iglice umieszczone na bramkach liniowo-szynowych, punkty uziemiające ograniczniki przepięć w rozdzielnicy 110kV).

Następnie prąd rozptywał się w przewodzących elementach uziomu stacji elektroenergetycznej, w instalacjach metalowych. Na skutek sprzężeń nakładał się na sieć potrzeb własnych i układ elektroenergetyczny podłączony do stacji. Do zamknięcia obwodu prądowego wykorzystano cztery pomocnicze elektrody wbijane w ziemię po za obszarem stacji i połączone przewodem z generatorem udarowym. Wzrost lokalnego potencjału mierzono między wybranymi punktami na terenie stacji a sztuczną ziemią odniesienia, którą stanowiła dodatkowa elektroda wybita w ziemię po za terenem stacji i połączona przewodem powrotnym z oscyloskopem rejestrującym przebiegi napięciowe (rys. 8).

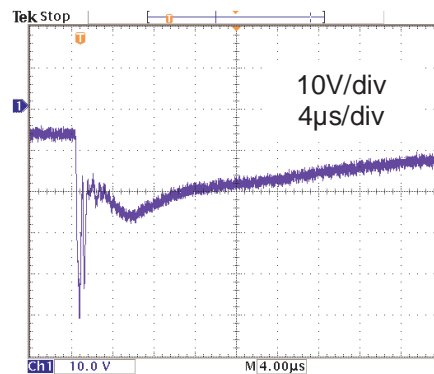
Prowadzone również były rejestracje napięć na zaciskach wejściowych zabezpieczeń cyfrowych CZIP-L stosowanych na terenie stacji, wzrosty potencjału

zacisków wejściowych względem ziemi odniesienia.

a)



b)



Rys. 8. Ogólny schemat połączeń podczas pomiarów na terenie stacji elektroenergetycznej 110/15kV (a) oraz przykładowe wyniki pomiarów (b)

W celu uniknięcia sprzężeń galwanicznych (do obwodów generatora i oscyloskopów rejestrujących) przyrządy pomiarowe w trakcie badań terenowych były zasilane z agregatu prądotwórczego i zespołu awaryjnych źródeł zasilania UPS.

4. KOMPUTEROWE METODY ANALIZY ZAGROŻENIE PIORUNOWEGO

Opracowanie skutecznych sposobów ochrony przed impulsowymi narażeniami elektromagnetycznymi wymaga prowadzenia szczegółowych badań. Komputerowe metody symulacyjne umożliwiają prowadzenie analiz narażeń elektromagnetycznych różnorodnych układów i systemów elektrycznych i elektronicznych w dowolnych obiektach budowlanych już w fazie ich projektowania. Koszty takich analiz są zwykle niższe w porównaniu do kosztów badań eksperymentalnych lub do strat powodowanych zniszczeniem urządzeń w przypadku nieskutecznej ochrony.

Wśród dostępnych obecnie narzędzi numerycznych można wyróżnić dwie główne grupy. Pierwszą stanowią programy wykorzystujące obwodowe metody analizy, drugą - programy oparte na metodach polowych. Specyfika ogólnej idei prowadzenia obliczeń w każdej z tych grup, oraz specyfika konkretnej metody symulacyjnej nakładają swoiste ograniczenia, szczególnie istotne przy analizie impulsowych narażeń elektromagnetycznych.

Wśród narzędzi bazujących na metodach obwodowych należy wymienić powszechnie znany i

ogólnie dostępny program ATP-EMTP lub jego komercyjna wersja EMTP-RV. Są to specjalistyczne narzędzia przeznaczone do analizy rozbudowanych układów elektrycznych oraz systemów elektroenergetycznych. Umożliwiają m.in. analizę zakłóceń symetrycznych i niesymetrycznych, zwarć, przepięć łączeniowych i atmosferycznych oraz innych stanów nieustalonych. Do zastosowań ogólnych wykorzystywany może być program PSpice.

W metodach obwodowych modelowany układ lub system przedstawiany jest w postaci obwodu elektrycznego o stałych skupionych lub rozłożonych. Do grupy programów symulacyjnych opartych na teorii pola elektromagnetycznego zaliczyć należy programy HIFREQ i MALZ wchodzące w skład pakietu CDEGS, program TRAGSYS a także programy AWAS i NEC-2.

Programy AWAS i NEC-2 umożliwiają prowadzenie symulacji jedynie dla struktur przewodzących umieszczonych nad przewodzącą płaszczyzną ziemi. Ziemia ta może być idealna lub rzeczywista o dowolnie zdefiniowanych parametrach elektrycznych, jednak nie jest możliwe modelowanie elementów zakopanych. W programach MALZ i TRAGSYS modelowane mogą być instalacje przewodzące zakopane w rzeczywistej ziemi. Zastosowane metody nie pozwalają na uwzględnienie elementów nadziemnych. Zakres częstotliwości jest również ograniczony, w programie MALZ do ok. 1 MHz.

Najbardziej elastycznym i posiadającym największe możliwości modelowania różnorodnych zjawisk elektromagnetycznych jest program HIFREQ. Umożliwia on równoczesne uwzględnienie elementów nadziemnych i zakopanych, a więc modelowanie zjawisk związanych z wyładowaniami piorunowymi w konstrukcje przewodzące, stanów nieustalonych powstających podczas wyładowań piorunowych i procesów łączeniowych, oddziaływania wyższych harmonicznych pól elektromagnetycznych itp.. Charakteryzuje się szerokim zakresem częstotliwości, od prądu stałego do kilkudziesięciu MHz. Program umożliwia m.in. obliczenia:

- potencjałów uziomów oraz połączonych z nimi konstrukcji nadziemnych;
- rozkładów pól elektromagnetycznych wokół stacji elektroenergetycznych oraz innych systemów i konstrukcji przewodzących;
- prądów i napięć indukowanych w rurach, różnego rodzaju konstrukcjach i obwodach wtórnych, powodowanych przepływem dużych prądów w pobliskich obwodach pierwotnych;
- prądów wirowych w ziemi powodowanych przepływem prądów w pobliskich elementach przewodzących.

W metodach opartych na teorii pola, zachodzące zjawiska elektromagnetyczne opisują dwupotencjałowe równania różniczkowo-całkowe, formułowane najczęściej w dziedzinie częstotliwości i rozwiązywane numerycznie metodą momentów. Struktura przewodząca reprezentowana jest za pomocą geometrycznej sieci cienkich cylindrycznych przewodów o zdefiniowanych wymiarach i właściwościach elektrycznych umieszczonej w jednorodnym lub niejednorodnym ośrodku (powietrze i grunt). Przewody sieci muszą zostać podzielone na krótsze segmenty. Przy założeniu, że średnice segmentów są co

najmniej kilkukrotnie mniejsze od ich długości, segmenty te funkcjonują jak dipole elektryczne. Poszukiwany rozptyw prądów w segmentach wyznaczany jest na podstawie sformułowania:

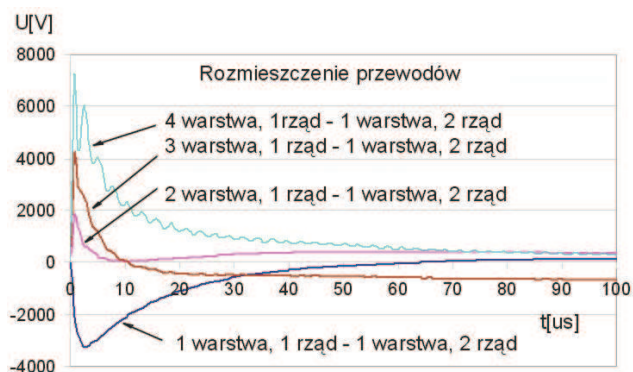
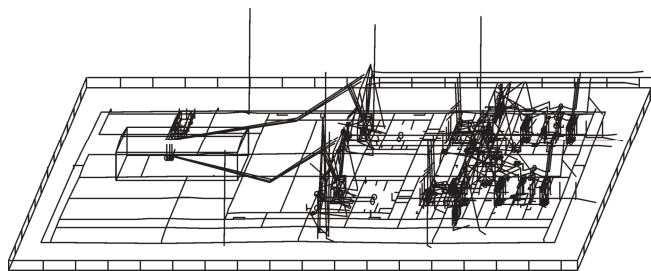
- na bazie równań Maxwella, równań dwupotencjałowych opisujących warunki brzegowe pól na powierzchniach segmentów oraz na granicy warstw ośrodka o różnych właściwościach elektrycznych;
- równań wynikających z zachowania praw Kirchhoffa w węzłach sieci i prądów wpływających do węzłów ze źródeł;
- równania matematycznego aproksymującego rozkład prądu wzdłuż pojedynczego segmentu sieci.

Po wyznaczeniu rozptywu prądów, obliczane są wszystkie pozostałe wielkości elektromagnetyczne.

3.1. Modele matematyczne zagrożenia piorunowego

Wykorzystując wyniki badań symulacyjnych oraz programy pakietu CDEGS opracowano modele matematyczne stacji elektroenergetycznych WN/SN oraz stacji bazowych. Źródłem zagrożenia był prąd udarowy o wartości szczytowej 100 kA i kształcie 10/350.

Przykłady opracowanych modeli oraz wyników obliczeń przedstawiono na rys. 9 i 10.

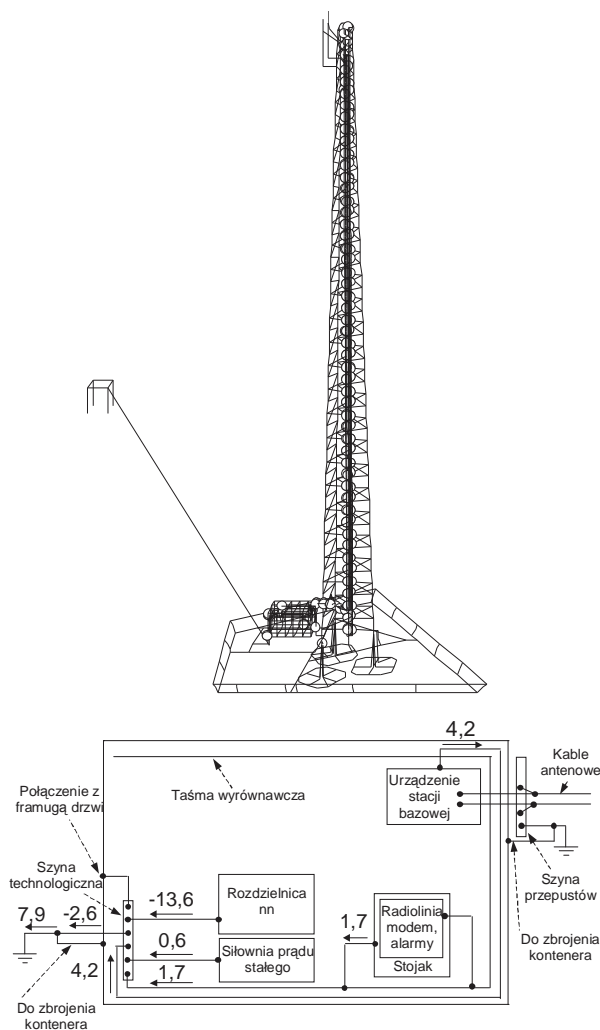


Rys. 9. Odwzorowany w przestrzeni trójwymiarowej model numeryczny stacji elektroenergetycznej oraz przykładowe zmiany różnic potencjałów pomiędzy liniami transmisyjnymi ułożonymi na różnych głębokościach

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Opracowanie skutecznych sposobów ochrony przed zagrożeniami występującymi podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w obiekty budowlane wymaga prowadzenia symulacyjnych badań terenowych w rzeczywistych obiektach.

Otrzymane wyniki są wykorzystywane do komputerowych symulacji zachodzących zjawisk. Połączenie badań symulacyjnych i analiz teoretycznych umożliwia prowadzenie określenia narażeń piorunowych różnorodnych układów i systemów elektrycznych i elektronicznych w dowolnych obiektach budowlanych.



Rys. 10. Model matematyczny stacji bazowej oraz przykład wyznaczonego rozplywu prądu udarowego w kontenerze podczas wyładowania w wieżę

5. BIBLIOGRAFIA

1. Augustyniak L.: Analiza przepięć atmosferycznych w sieciach komputerowych w obiektach budowlanych. Rozprawa Doktorska, Białystok 1998.
2. Bejleri M., Rakov A., Uman M., Rambo K.J., Mata C.T., Fernandez M.I.: Triggering Lightning Testing of an Airport Runway Lighting System. IEEE Trans. on EMC, vol.46, no 1, 2004.
3. Diendorfer G., Hadrian W., Jobst R.; Simulation von Direkten Blitzeinschlägen in den Funkmast von Hochspannungsschaltanlagen: Praktische Durchführung der Messungen; 18th ICLP, München, 1985.
4. 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, 12-16.08.1991.
5. Markowska R.: Investigation of Lightning Electromagnetic Pulse Effects in GSM Base Station. 27th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2004, Francje 2004.
6. 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, vol. 17, no. 2, April 2002, pp. 575–586.
7. Sowa A.: Analiza zagrożenia piorunowego urządzeń elektronicznych. Rozprawy Naukowe nr 2. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 1990,
8. Wiater J.: Sowa A.: Lightning transients in control lines at the large urban area HV substation, California August 9 – 13, 2004. IEEE International EMC Symposium on Electromagnetic Compatibility Santa Clara USA,
9. 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, vol. 45, no. 1, February 2003; pp. 82–91
10. „HIFREQ User’s Manual: Frequency Domain Analysis of Buried Conductor Networks”; Safe Engineering Services & Technologies Ltd.; Montreal, Canada.

RESEARCH ON LIGHTNING THREAT IN ELECTRONIC SYSTEMS

Key words: lightning protection, lightning overvoltages, lightning threat

The paper presents an overview on different research methods of lightning threat in electronic systems and equipment. These methods were divided in three major groups. The first group refers to measurements and registration of lightning currents and voltages generated during natural or triggered lightning strikes. Not many results of such investigations is available so far due to technical, economical and natural restrictions or limitations. Such researches are usually carried out for tall or large structures located in tropical areas. The second group of research on lightning threat consists of approximate, simulation methods in which surge current and voltage generators are used to force surge current flows in conductive elements of a building or a structure. Surge currents and voltages generated in wires and cables of electronic and electric systems using this method were recorded in various structures. Some example results are presented for large buildings, base stations of mobile communication system and high-voltage substations. Finally, the computer simulation methods of research on lightning threat are presented. The most widely known methods, namely the circuit method and the method based on electromagnetic field theory, are described in detail together with some examples of modeling of lightning strikes to the base station communication tower and the high-voltage substation.