

Renata MARKOWSKA, Andrzej SOWA, Jarosław WIATER
POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

Badania zagrożenia piorunowego wybranych układów elektronicznych systemów kontrolno-pomiarowych

Dr inż. Renata MARKOWSKA

Od 2006 roku posiada stopień doktora nauk technicznych w dziedzinie elektrotechnika w specjalności kompatybilność elektromagnetyczna. Zatrudniona w Katedrze Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej na stanowisku adiunkta. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami analizy i oceny zagrożeń piorunowych oraz ochrony przed przepięciami systemów elektrycznych i elektronicznych w obiektach budowlanych, w szczególności telekomunikacyjnych.

e-mail: remark@pb.edu.pl



Dr hab. inż. Andrzej SOWA

Dr hab. inż. Andrzej Sowa prof. Politechniki Białostockiej, jest absolwentem Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej. Od roku 1979 pracuje w Politechnice Białostockiej. Obecnie jest kierownikiem Katedry Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej Zakres jego zainteresowań zawodowych obejmuje zagadnienia ochrony odgromowej obiektów budowlanych, przepięciowej urządzeń i systemów elektronicznych, kompatybilności elektromagnetycznej i wysoko-napięciowej techniki pomiarowej.

e-mail: andrzej.sowa@ochrona.ney.pl



Dr inż. Jarosław WIATER

Od 2002 roku jest pracownikiem Katedry Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej Politechniki Białostockiej. Od 2007 roku jest członkiem Polskiego Komitetu Ochrony Odgromowej. W 2009 roku uzyskał stopień naukowy doktora. Jest autorem 102 publikacji naukowych. Obecne zainteresowania naukowo-techniczne skupiają się na analizie zagrożeń piorunowych zaawansowanych systemów energetycznych wykorzystywanych w nowoczesnych systemach zarządzania.

e-mail: jaroslawwiater@we.pb.edu.pl



1. Wstęp

Od kilkudziesięciu lat podejmowane są próby oceny zagrożenia systemów elektronicznych 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,
- symulacyjnych badań terenowych polegających na wymuszaniu przepływu prądów udarowych 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 rozplywający się prąd piorunowy,
- poziomów napięć i prądów indukowanych w instalacji elektrycznej i obwodach sygnałowych,
- skuteczności ekranowania elementów konstrukcyjnych obiektu przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym.

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 elektronicznych, jest podjęta w Politechnice Białostockiej próba wykorzystania wyników symulacyjnych badań terenowych do opracowania modeli matematycznych opisujących zjawiska zachodzące podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w obiekty budowlane. Stworzone modele można następnie wykorzystać do określania zagrożeń wywołanych przez rozplywający się prąd piorunowy o różnych kształtach i wartościach szczytowych oraz do oceny właściwości ochronnych różnorodnych rozwiązań urządzeń piorunochronnych.

2. Symulacyjne badania terenowe

Omawianą metodę symulacyjnych badań terenowych zastosowano po raz pierwszy do oceny zagrożenia piorunowego urządzeń elektronicznych pracujących w dwupiętrowym obiekcie budowlanym [2]. Źródłem prądów udarowych wprowadzanych do urządzenia piorunochronnego był generator umieszczony na dachu obiektu. Przepięcia rejestrowano w pętlach tworzonych z przewodów ułożonych na ścianach i na podłodze w pomieszczeniu na 2-gim piętrze (rys. 1a).

Streszczenie

Stworzenie kompleksowej ochrony urządzeń i systemów przed narażeniami piorunowymi wymaga przeanalizowania występującego zagrożenia oraz dobrania odpowiednich sposobów ochrony. Podstawowe informacje o zagrożeniu wywołanym przez rozplywający się prąd udarowy otrzymano prowadząc symulacyjne badania terenowe w rzeczywistych obiektach budowlanych. Porównując wyniki badań terenowych i obliczeń numerycznych opracowano modele matematyczne opisujące zjawiska zachodzące podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w urządzeniach piorunochronne obiektów. Opracowane modele wykorzystano do określenia zagrożeń piorunowych wybranych układów kontrolno-pomiarowych.

Słowa kluczowe: wyładowanie piorunowe, systemy kontrolno-pomiarowe, symulacyjne badania terenowe.

Research on lightning threat in selected electronic control and measuring systems

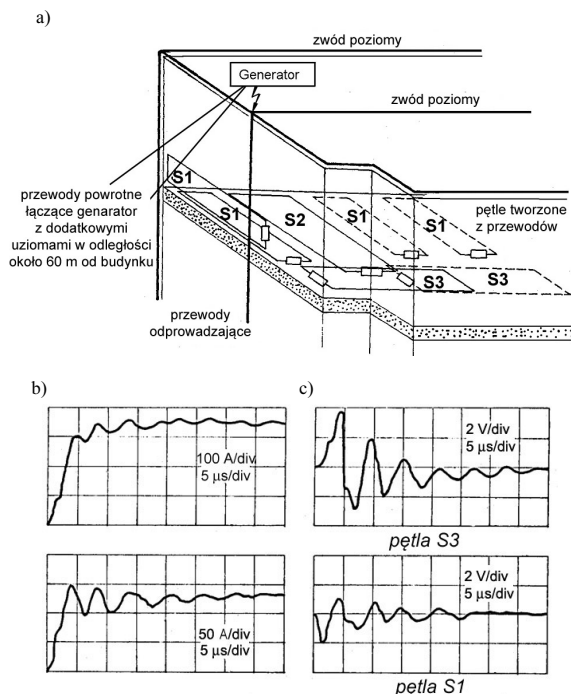
Abstract

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 were obtained by conducting experimental simulation investigations of actual objects exposed to lightning [1-3]. In these experiments a surge generator was used as a source of the surge current. The generator was placed on the ground or on the analyzed object roof. It was connected to the object LPS and to its grounding system or auxiliary ground electrodes (Figs. 1, 2, 4, 6). Under such conditions, there were measured the surge current flows in conductive construction elements and equipotential bonding systems of the objects as well as the ground potential rises of these elements (Figs. 1, 3, 5, 6). The information obtained this way was then used for creating mathematical models of the phenomena observed during these experiments. Comparison of the measurement and calculation results allowed for developing the 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 to their LPS. The numerical analysis of these phenomena enabled determination of surge voltages and currents that arise in electronic control and measuring systems as a result of lightning current flows in the LPS of various buildings (Figs. 7, 8).

Keywords: lightning stroke, control and measuring systems, experimental simulation investigations.

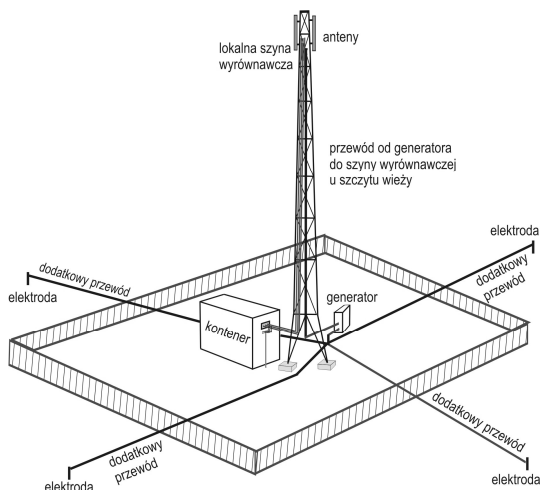
Zastosowany generator umożliwił wprowadzenie do przewodów urządzenia piorunochronnego prądów udarowych o wartościach szczytowych dochodzących do 350 A, czasach czoła 2-3 μ s oraz czasach do półszczytu ok. 700 μ s. Przykładowe przebiegi generowanych prądów udarowych i napięć indukowanych przez te prądy w układach przewodów przedstawiono na rys. 1b i c.

Podobne badania prowadzono w obiektach składających się z wież antenowych o wysokości 50 m - 60 m i ustawionych obok kontenerów z aparaturą elektroniczną. Otrzymane wyniki wykorzystano do oceny zagrożenia piorunowego urządzeń elektronicznych w stacjach bazowych i systemów kontrolno-pomiarowych w stacjach sterowania zaworami w gazociągach lub ropociągach.



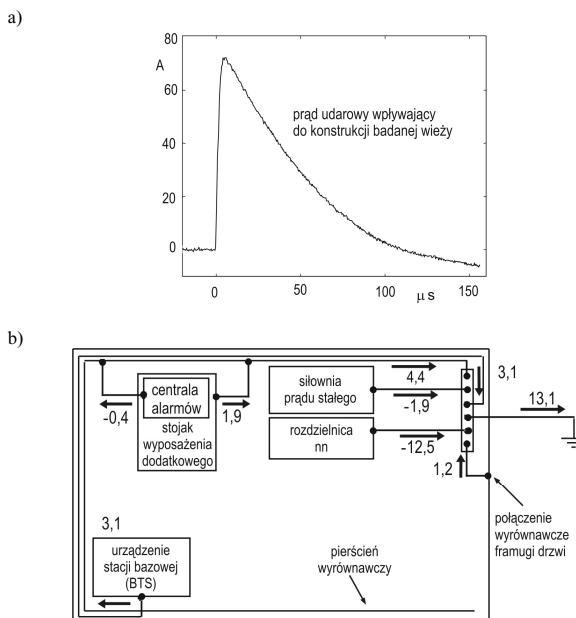
Rys. 1. Pomiary napięć indukowanych w pętlach wewnątrz obiektu; a) rozmieszczenie pętli w obiekcie oraz obwód prądu udarowego, b) prądy wprowadzane do urządzenia piorunochronnego, c) napięcia indukowane przez te prądy w pętlach
Fig. 1. Measurements of voltages induced in loops inside the structure; a) arrangement of studied loops and the surge current circuit, b) surge currents injected in the LPS, c) voltages induced in the loops by these currents

W badanych obiektach prąd udarowy doprowadzono izolowanym przewodem z generatora udarowego do lokalnej szyny wyrównawczej znajdującej się u szczytu wieży. Prąd ten rozplýwał się w przewodzących elementach konstrukcyjnych wieży oraz w systemie wyrównawczym i uziomowym badanego obiektu (rys. 2).



Rys. 2. Symulacyjne badania terenowe w obiekcie wieża-kontener
Fig. 2. Experimental simulation investigations in a structure tower- container

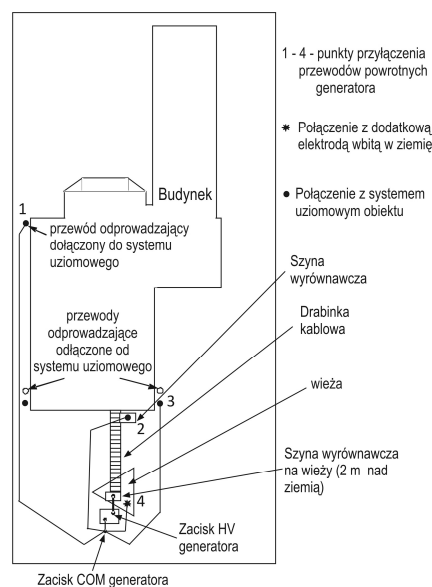
Do zamknięcia obwodu prądowego wykorzystano dodatkowe przewody powrotne łączące generator z uziemionym ogrodzeniem lub dodatkowymi elektrodami wbitymi w ziemię w pewnej odległości od stacji. Pomiary prowadzono nie przerywając normalnej pracy stacji. Ze względu na zastosowaną drogę prądu udarowego z generatora na szczyt wieży (prąd płynie równoległe do konstrukcji wieży), nie są możliwe badania efektów sprzężeń indukcyjnych powodowanych prądem rozplýwającym się w wieży (prąd płynie w dół). Przykładowe wyniki pomiarów rozplýwu prądów udarowych w elementach systemu wyrównywania potencjałów oraz przewodach wewnątrz kontenera przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. 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)

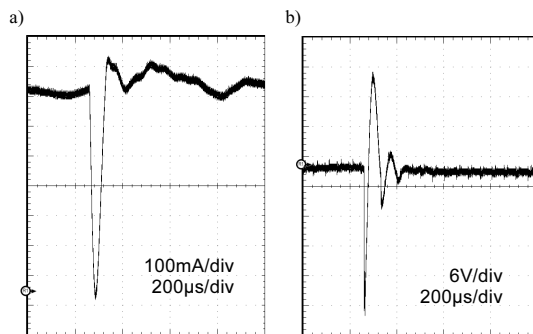
Fig. 3. Experimental simulation investigations of lightning threat; a) current injected to the tower construction, b) surge current distribution in bonding conductors inside the container (the peak values of currents in % of the current injected to the tower)

Symulacyjne badania terenowe efektów związanych z rozplýwem prądu udarowego prowadzono także w dużym obiekcie budowlanym stojącym obok wysokiej wieży antenowej (rys. 4.).



Rys. 4. Plan obiektu wieża- budynek z rozmieszczeniem obwodu prądu udarowego
Fig. 4. Top plan of the structure tower- building together with the layout of the surge generator circuit

Przykładowe wyniki pomiarów prądów i napięć udarowych w systemie wyrównywania potencjałów jednej z szaf sterowniczych wewnątrz obiektu przedstawiono na rys. 5. Należy zaznaczyć, że wzrost potencjału nie oznacza wzrostu zagrożenia piorunowego.



Rys. 5. Przykładowe przebiegi prądu i napięcia w systemie wyrównywania potencjałów wewnątrz obiektu; a) prąd wpływający do szyny wyrównawczej; b) wzrost potencjału szyny wyrównawczej względem ziemi odniesienia

Fig. 5. Examples of current and voltage in the bounding system inside the structure; a) current flowing into a bounding bar, b) ground potential rise of a bounding bar

W przedstawionych do tej pory symulacyjnych badaniach terenowych próbowano odwzorowywać rozptyw prądu piorunowego w obiekcie. Podobne badania prowadzono także w przypadkach wymuszenia przepływu prądu udarowego w obwodzie różniącym się od tego, jaki wystąpi podczas bezpośredniego wyładowania w obiekt. Takie rozwiązanie przyjęto w symulacyjnych badaniach terenowych prowadzonych w stacjach elektroenergetycznych [3, 5]. Uwzględniając fakt, iż obiekty te muszą pracować w czasie prowadzenia pomiarów oraz niemożliwe jest dokonywanie w nich wyłączeń, rozłączeń i przełączeń, rejestrowano wzrost lokalnego potencjału w różnych miejscach na terenie stacji względem ziemi odniesienia.

Prąd udarowy doprowadzono do punktów na terenie stacji najbardziej narażonych na bezpośrednie wyładowanie piorunowe (zwody pionowe wolnostojące oraz umieszczone na bramkach liniowo-szynowych, punkty uziemiające ograniczniki przepięć w rozdzielni 110kV). Następnie prąd rozptywał się w systemie uziomowym i przewodzących elementach nadziemnych stacji elektroenergetycznej. Do zamknięcia obwodu prądowego wykorzystano pomocniczy uziom w postaci czterech elektrod pionowych, wbitych w ziemię poza obszarem stacji i połączony przewodem z generatorem udarowym G (rys. 6a).

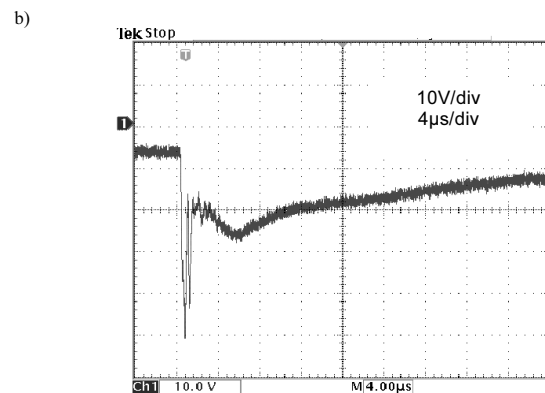
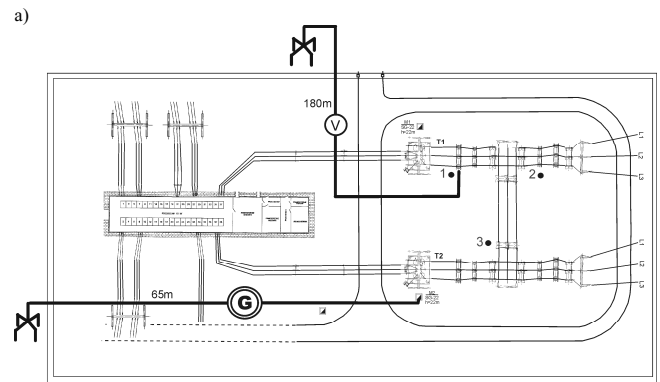
Wzrost lokalnego potencjału mierzono między wybranymi punktami na terenie stacji a innym dodatkowym uziomem, który stanowiła elektroda pionowa wybita w ziemię poza terenem stacji i połączona przewodem powrotnym z oscyloskopem rejestrującym przebiegi napięciowe V (rys. 6a). Prowadzono także rejestracje napięć na zaciskach wejściowych zabezpieczeń cyfrowych CZIP-L stosowanych na terenie stacji oraz wzrosty potencjału zacisków wejściowych względem ziemi odniesienia (rys. 6b).

Wykorzystując wyniki pomiarów bezpośrednio do oceny zagrożeń piorunowych należy zdawać sobie sprawę z wad prezentowanej metody symulacyjnych badań terenowych. Względny techniczny oraz wymagania zapewnienia ciągłej i niezawodnej pracy analizowanych systemów kontrolno-pomiarowych stwarzają konieczność ograniczenia wartości szczytowych prądów udarowych stosowanych w badaniach terenowych do poziomów:

- kilkadziesiąt - kilkaset amperów w przypadku badań w obiektach, w których normalnie pracują urządzenia elektroniczne,
- kilka kiloamperów w pozostałych przypadkach.

Zagrożenie stwarzane przez prądy udarowe może różnić od tego, jakie wystąpi podczas wyładowania piorunowego gdyż:

- pomijane jest oddziaływanie na systemy elektroniczne impulsowego pola elektromagnetycznego wywołanego przez prąd piorunowy płynący w kanale wyładowania,
- występują sprzężenia pojemnościowe i indukcyjne pomiędzy badanymi instalacjami lub obwodami a dodatkowymi przewodami stosowanymi do tworzenia obwodu prądowego.



Rys. 6. Symulacyjne badania terenowe w stacji elektroenergetycznej 110/15kV; a) układy połączeń obwodów pomiarowych, b) wzrostu potencjału szyny wyrównawczej w sterowni względem ziemi odniesienia

Fig. 6. Experimental simulation investigations at the power station 110/15 kV; a) arrangements of measuring circuits, b) ground potential rise of a bounding bar in the control room

Uwzględniając powyższe uwagi 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 rozptyływający 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.

3. Symulacje i analizy komputerowe

Otrzymane wyniki symulacyjnych badań terenowych wykorzystano do opracowania modeli matematycznych opisujących zjawiska zachodzące podczas badań terenowych, a następnie podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w analizowane obiekty.

Z dostępnych programów wybrano 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 zakopanyymi 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].

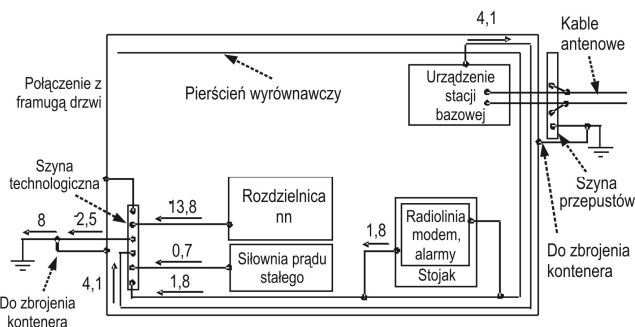
Na podstawie oryginalnych planów analizowanych w pracy obiektów budowlanych, przeprowadzonych w nich wizji lokalnych i pomiarów stworzono ich trójwymiarowe cienko-przewodowe reprezentacje w programie HIFREQ. Reprezentacje te wykorzystano do opisu zjawisk elektromagnetycznych zachodzących podczas symulacyjnych badań terenowych. Porównanie wyników obliczeń i pomiarów umożliwiło wybranie optymalnej reprezentacji danego obiektu, tj. zapewniającej otrzymanie wyników obliczeń najbardziej zbliżonych do wyników pomiarów.

Reprezentacje te wykorzystano następnie do analiz zjawisk zachodzących podczas wyładowań piorunowych. Źródłem zagrożenia były prądy udarowe o wartościach szczytowych 100 kA lub 25 kA i kształtach odpowiednio 10/350 μ s oraz 0,25/100 μ s. Prądy te opisane były następującą zależnością:

$$i(t) = \frac{I_{\max}}{k} \frac{(t/\tau_1)^{10}}{1+(t/\tau_1)^{10}} \exp(-t/\tau_2)$$

w której: I_{\max} – wartość szczytowa prądu, k – współczynnik korekcyjny wartości szczytowej prądu, τ_1 , τ_2 – odpowiednio stałe czasu czoła i czasu grzbietu, t – czas.

Przykładowe wyniki obliczeń rozptyłu części prądu piorunowego dla obiektu wieża - kontener przedstawiono na rys. 7.

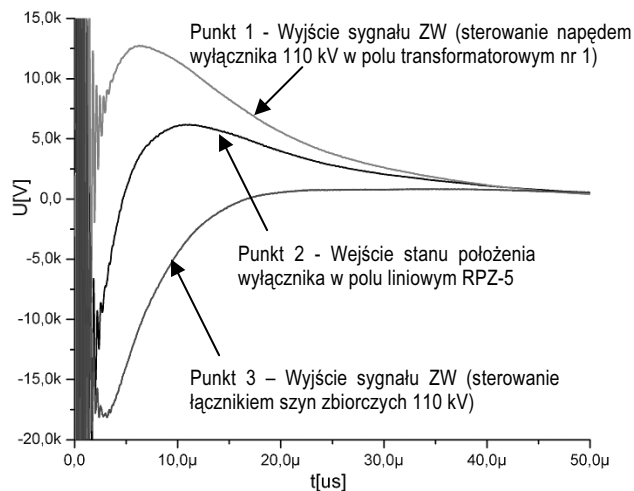


Rys. 7. Rozptył części prądu udarowego 100 kA, 10/350 w kontenerze podczas wyładowania piorunowego w wieżę stacji bazowej GSM
Fig. 7. Distribution of a part of lightning current 100 kA, 10/350 μ s in the container during direct lightning strike to the tower of a GSM base station

Na uwagę zasługuje część prądu piorunowego odpływająca do systemu wyrównywania potencjałów ze stojaka urządzeń dodatkowych w kontenerze (1,8 % całości prądu piorunowego). Na stojaku tym umieszczono główne urządzenie systemu radiowej kontroli i sterowania pracą stacji (radiolinia), a także centralę systemu alarmowego. Występowanie prądów o tak dużych wartościach szczytowych wynika z faktu bezpośredniego połączenia urządzenia radiolinii z antenami na wieży.

Analiza zjawisk występujących podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego w zwody na terenie stacji elektroenergetycznej jest bardziej złożona. Wyniki przeprowadzonych obliczeń wykazały możliwość wystąpienia względnych różnic potencjałów między przewodami systemów kontrolno-pomiarowych rzędu kilkunastu woltów. W przypadku bardziej oddalonych od siebie punktów pomiarowych - rzędu kilku kilowoltów. Napięcia na przewodach sygnałowych dochodzących z wybranych punktów na

terenie rozdzielni 110 kV do nastawni względem lokalnej szyny wyrównywania potencjałów w tym obiekcie dochodziły do kilkudziesięciu kilowoltów (rys. 8).



Rys. 8. Obliczone napięcia na wybranych wejściach/wyjściach systemu sterowania i pomiarów (rys. 6a) w stacji elektroenergetycznej 110/15 kV ($t \in <0;50>$ μ s, dla $U \in <-20;15>$ kV) wywołane przez prąd piorunowy 100 kA, 10/350 μ s [5]

Fig. 8. Calculated voltages at selected inputs/outputs of the control and measuring system (Fig. 6a) in the power substation 110/15 kV ($t \in <0;50>$ μ s, for $U \in <-20;15>$ kV) caused by lightning current 100 kA, 10/350 μ s [5]

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

4. Wnioski

Przedstawiona metoda analizy zagrożenia piorunowego jest możliwa do zastosowania w większości obiektów budowlanych. Dobierając odpowiednio parametry prądów udarowych wprowadzanych do urządzeń piorunochronnych można wykonywać pomiary napięć/prądów powstających w różnorodnych systemach kontrolno-pomiarowych pracujących w analizowanych obiektach. Otrzymane wyniki pomiarów, stanowiące ważne źródło informacji o zjawiskach zachodzących w obiekcie podczas przepływu prądów udarowych, można wykorzystać do tworzenia modeli matematycznych opisujących zagrożenie stwarzane przez prądy wyładowań piorunowych.

Praca naukowa finansowana ze środków na badania statutowe Uczelni jako projekt badawczy nr S/WE/1/05.

5. Literatura

- [1] Markowska R.: Investigation of Lightning Electromagnetic Pulse Effects in GSM Base Station. 27th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2004, Francja 2004.
- [2] Sowa A.: Analiza zagrożenia piorunowego urządzeń elektronicznych. Rozprawy Naukowe nr 2. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, 1990.
- [3] 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.
- [4] „HIFREQ User's Manual: Frequency Domain Analysis of Buried Conductor Networks”; Safe Engineering Services & Technologies Ltd.; Montreal, Canada.
- [5] Wiater J.: “Analiza zagrożenia piorunowego systemów sterowania i nadzoru stacji elektroenergetycznych”, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej.