

Politechnika Białostocka
Wydział Elektryczny
Katedra Telekomunikacji i Aparatury Elektronicznej

Analiza zagrożenia piorunowego urządzeń w obiektach radiokomunikacyjnych

Rozprawa doktorska

mgr inż. Renata Markowska

Promotor:

dr hab. inż. Andrzej Witold Sowa
profesor nadzwyczajny Politechniki Białostockiej

Białystok, 2006

Spis treści

Terminologia	4
1. Wstęp	7
1.1. Obecny stan wiedzy i badań oddziaływań wyładowań piorunowych w obiektach budowlanych.....	7
1.2. Cel, teza i zakres pracy.....	10
2. Charakterystyka źródeł zagrożenia	15
2.1. Fizyczne podstawy wyładowania.....	15
2.1.1 Powstawanie ładunku wewnątrz chmury burzowej.....	15
2.1.2 Rozwój wyładowania.....	16
2.2. Parametry prądu piorunowego.....	17
2.3. Modelowanie głównego wyładowania piorunowego.....	18
2.4. Analiza ryzyka uszkodzenia instalacji i urządzeń w wyniku wyładowań piorunowych w wieżę stacji radiokomunikacyjnej.....	24
3. Charakterystyka urządzeń piorunochronnych oraz systemów zasilania w obiektach radiokomunikacyjnych	26
3.1. Konfiguracje urządzeń piorunochronnych.....	26
3.1.1 Zewnętrzne urządzenie piorunochronne.....	26
3.1.2 Wewnętrzne urządzenie piorunochronne.....	28
3.2. Zasilanie w obiektach radiokomunikacyjnych.....	31
3.3. Podsumowanie.....	31
4. Teoretyczne podstawy analiz numerycznych	32
4.1. Pole elektromagnetyczne liniowego źródła prądu.....	32
4.2. Wyznaczenie rozplywu prądów.....	36
4.3. Właściwości algorytmu przekształcenia Fourier'a.....	38
5. Badania terenowe	40
5.1. Metodyka badań i charakterystyka wykorzystywanej aparatury.....	43
5.2. Przedstawienie wyników badań.....	45
5.2.1. Stacja bazowa Karczmisko.....	45
5.2.2. Stacja bazowa w Goniądzu.....	55
5.3. Analiza dokładności pomiarów.....	57
5.4. Podsumowanie wyników badań.....	61
6. Weryfikacja modeli numerycznych	66
6.1. Ogólny opis modeli matematycznych.....	66

6.2. Porównanie wyników pomiarów terenowych z wynikami obliczeń numerycznych.....	71
6.3. Porównanie rozptyłów prądów w modelach rozbudowanym oraz podstawowym.....	83
6.4. Obliczenia dla źródeł prądu umieszczanych na szczycie wieży.....	84
6.5. Podsumowanie.....	88
7. Bezpośrednie wyładowanie pioruna w wieżę stacji.....	91
7.1. Pierwsze wyładowanie główne.....	91
7.2. Analiza zjawisk falowych.....	100
7.3. Następne wyładowanie piorunowe.....	114
7.4. Podsumowanie.....	119
7.5. Obiekt radiokomunikacyjny typu wieża-budynek.....	120
8. Podsumowanie.....	125
Literatura.....	129
Załącznik: Wyniki pomiarów przeprowadzonych w stacji Goniądz.....	138

Terminologia

Główna szyna uziemiająca (szyna technologiczna)

Szyna przeznaczona do przyłączenia do uziomu przewodów ochronnych, w tym przewodów połączeń wyrównawczych oraz uziemienia funkcjonalnego (PN-T-45000-1: 1998).

Instalacje metalowe

Ciągi elementów metalowych chronionej przestrzeni, które mogą tworzyć drogę dla prądu piorunowego, jak: rurociągi, poręcze schodowe, szyny dźwigów, ciągi wentylacyjne, grzewcze i klimatyzacyjne oraz wzajemnie połączona stal zbrojeniowa (PN-IEC 61024-1: 2001).

Pierścień wyrównawczy

Zbiorczy przewód wyrównawczy w kształcie pierścienia zamkniętego lub otwartego ułożonego wzdłuż ścian pomieszczenia lub obiektu (PN-T-45000-1: 1998).

Przewód odprowadzający

Część zewnętrznego urządzenia piorunochronnego przeznaczona do odprowadzania prądu piorunowego od zwodu do uziemienia (PN-IEC 61024-1: 2001).

Przewód uziomowy

Przewód nieizolowany łączący uziom lub zespół uziomów z szyną uziemiającą lub zaciskiem probierczym (PN-T-45000-1: 1998).

Przewód wyrównawczy

Przewód przeznaczony do wyrównywania potencjałów (PN-IEC 61024-1: 2001).

System uziemienia i wyrównywania potencjałów (instalacja uziemienia i wyrównywania potencjałów)

Układ składający się z uziomów, przewodów uziemiających, przewodów wyrównawczych zbiorczych i indywidualnych (PN-T-45000-1: 1998).

System wyrównywania potencjałów (BN – ang. Bonding Network)

Sieć wzajemnie połączonych elementów przewodzących stanowiących ochronę ludzi i urządzeń przed skutkami zakłóceń elektromagnetycznych o częstotliwościach od 0 do niskich częstotliwości radiowych (ITU-T K.27: 05/96).

Szyna uziemiająca

Szyna przeznaczona do połączenia przewodów uziemiających, ochronnych i połączeń wyrównawczych oraz innych instalacji metalowych do systemu uziomów.

Szyna uziemiająca przepustów

Szyna przeznaczona do połączenia przewodów uziemiających kabli antenowych do systemu uziomów przy wprowadzeniu ich do obiektu.

Szyna wyrównawcza

Szyna, za pomocą której łączone są z urządzeniem piorunochronnym metalowe instalacje, zewnętrzne części przewodzące, linie energetyczne i telekomunikacyjne oraz inne przewody (PN-IEC 61024-1: 2001).

Urządzenie piorunochronne (instalacja piorunochronna, instalacja odgromowa, LPS – ang. Lightning Protection System)

Kompletne urządzenie stosowane do ochrony przestrzeni przed skutkami uderzeń piorunów (PN-IEC 61024-1: 2001).

Urządzenie stacji bazowej (BTS – ang. Base Transceiver Station)

Urządzenie radiowe stacji bazowej nadawczo-odbiorczej (BTS) lub systemu stacji bazowych (BSS) (PN-ETS 300 342-2: 1999) służące utrzymaniu zasadniczych usług telekomunikacyjnych.

Uziemienie

Część zewnętrznego urządzenia piorunochronnego przeznaczona do odprowadzania do ziemi i rozpraszania w niej prądu piorunowego (PN-IEC 61024-1: 2001).

System lub czynność połączenia obiektu uziemianego z systemem uziemiającym (PN-T-45000-1: 1998).

Uziom

Przedmiot lub zespół przedmiotów umieszczonych w gruncie (ziemi) tworzący elektryczne połączenie z tym gruntem (ziemią) (PN-T-45000-1: 1998).

Uziom naturalny

Zespół przedmiotów przewodzących umieszczonych w ziemi dla potrzeb innych niż instalacje elektryczne; rurociągi wodno-kanalizacyjne, gazowe itp., oraz zbrojenia betonu osadzone w ziemi (PN-T-45000-1: 1998).

Uziom otokowy

Uziom poziomy ułożony w gruncie wokół chronionego obiektu (PN-T-45000-1: 1998).

Uziom pionowy (szpilkowy)

Uziom ułożony swym największym wymiarem prostopadle do powierzchni ziemi (PN-T-45000-1: 1998).

Uziom poziomy (promieniowy)

Uziom ułożony swym największym wymiarem równoległe do powierzchni ziemi (PN-T-45000-1: 1998).

Wspólny system wyrównywania potencjałów (CBN – ang. Common Bonding Network) wspólny system uziemiający

Sieć wszystkich wzajemnie połączonych instalacji metalowych obiektu tworzących podstawowy system wyrównywania potencjałów i uziemienia. Elementy te obejmują stal konstrukcyjną lub elementy zbrojeniowe, metalowe rurociągi, stojaki urządzeń i półki kablowe, przewody ochronne, przewody wyrównawcze, zewnętrzne urządzenie piorunochronne itp. (ITU-T K.27: 05/96).

Wyposażenie dodatkowe

Urządzenie (aparatura) zastosowane w połączeniu z odbiornikiem, nadajnikiem lub urządzeniem nadawczo-odbiorczym (PN-ETS 300 342-2: 1999):

- przeznaczone do zastosowania w połączeniu z odbiornikiem, nadajnikiem lub urządzeniem nadawczo-odbiorczym w celu uzyskania dodatkowych właściwości operacyjnych i/lub sterujących urządzenia radiowego; i

- nie może być zastosowane jako samodzielne urządzenie, spełniające swoje funkcje bez odbiornika, nadajnika lub urządzenia nadawczo-odbiorczego; i
- nie jest to podzespół głównego urządzenia niezbędny do spełniania podstawowych funkcji urządzenia.

Zacisk probierczy (uziemiający)

Złącze zaprojektowane i zastosowane w celu ułatwienia elektrycznych prób i pomiarów części składowych urządzenia piorunochronnego (PN-IEC 61024-1: 2001).

Zacisk przeznaczony do odłączania uziemionych przedmiotów od uziomu przy pomiarze rezystancji uziemienia (PN-T-45000-1: 1998).

Zwody

Część zewnętrznego urządzenia piorunochronnego przeznaczona do przejmowania wyładowań piorunowych (PN-IEC 61024-1: 2001).

1. Wstęp

Ochrona ludzi oraz urządzeń elektrycznych i elektronicznych przed skutkami wyładowań atmosferycznych ciągle stanowi poważny problem. Przyczynia się do tego niszczycielska, w znacznym stopniu przypadkowa i nie do końca jeszcze zbadana natura wyładowania. Dodatkowym czynnikiem zwiększającym zagrożenie piorunowe jest powszechne stosowanie coraz bardziej rozbudowanych systemów elektronicznych. Miniaturyzacja urządzeń elektronicznych w takich systemach, połączona z obniżeniem poziomów przesyłanych sygnałów, powoduje zmniejszenie ich odporności na oddziaływanie piorunowych impulsów elektromagnetycznych.

W świetle powyższych faktów, coraz ważniejszym zadaniem staje się przeprowadzenie dokładnej analizy oraz właściwa ocena występującego zagrożenia piorunowego.

Złożoność zagadnienia ujawnia się szczególnie w przypadku bezpośrednich wyładowań piorunowych w obiekty budowlane. Występują wówczas różnorodne mechanizmy sprzężeń zarówno pomiędzy kanałem wyładowania a elementami systemów i instalacji w obiekcie jak i pomiędzy poszczególnymi elementami tych systemów i instalacji. Uwzględnienie wszystkich wzajemnych oddziaływań wymaga przeprowadzenia całościowej analizy obejmującej zarówno obiekt trafiony przez piorun, jak i inne połączone z nim obiekty oraz systemy.

Niniejsza praca dotyczy przypadków bezpośrednich wyładowań piorunowych w niewielkie wolnostojące stacje radiokomunikacyjne. Są to obiekty o szczególnie wysokim stopniu zagrożenia piorunowego, które wynika z ich specyficznych cech konstrukcyjnych (obecność wysokich wież lub masztów), lokalizacji (najczęściej na otwartym terenie, często na wzniesieniach) oraz zawartości (wrażliwe urządzenia elektroniczne). Wysokie prawdopodobieństwo bezpośredniego wyładowania piorunowego w pojedynczą stację w połączeniu z gwałtownie wzrastającą ich liczbą powodują, że stają się one jednymi z najbardziej reprezentatywnych typów obiektów do prowadzenia analiz zagrożenia piorunowego.

W pracy skoncentrowano się na analizie zagrożenia piorunowego typowych stacji bazowych telefonii komórkowej GSM (ang. Global System for Mobile Communications), składających się z niewielkiego kontenera z aparaturą zlokalizowanego obok wieży. Przedstawiono również krótkie podsumowanie wyników uproszczonych analiz numerycznych bezpośredniego wyładowania piorunowego w wieżę znajdującą się obok budynku telekomunikacyjnego. W obu przypadkach ograniczono się do wież o wysokościach ok. 40 – 60 m.

1.1. Obecny stan wiedzy i badań oddziaływań wyładowań piorunowych w obiektach budowlanych

Od wielu lat, w różnych krajach podejmowane są badania sposobów i efektów oddziaływania bezpośrednich wyładowań piorunowych na różnorodne obiekty budowlane. Ich celem jest wypracowanie efektywnych metod oceny występujących zagrożeń piorunowych oraz skutecznych sposobów ochrony przed nimi. Złożoność zagadnienia oraz występujące ograniczenia techniczne i ekonomiczne powodują, że zarówno wyniki badań eksperymentalnych jak i analiz teoretycznych umożliwiają najczęściej jedynie fragmentaryczną analizę i ocenę zagrożenia piorunowego ludzi oraz urządzeń. Ciągle istnieje jeszcze szereg nierozstrzygniętych

kwestii dotyczących wpływu różnorodnych potencjalnie ważnych czynników, które powinny być w odpowiedni sposób uwzględnione w analizach.

Najbardziej wiarygodnych i wyczerpujących informacji dostarczają pomiary prowadzone w naturalnych warunkach podczas rzeczywistych wyładowań piorunowych w obiekty budowlane [20, 84, 116]. Wyniki takich badań określają:

- rozprędy prądów piorunowych w przewodzących elementach konstrukcji, instalacjach wyrównywania potencjałów obiektów, liniach elektroenergetycznych sieci zasilających, systemach transmisji sygnałów czy falowodach [116];
- napięcia i prądy udarowe indukowane w okablowaniu systemów [116];
- wartości szczytowe oraz charakter zmian pola elektromagnetycznego [20].

Konieczność stosowania kosztownej aparatury pomiarowej do prowadzenia długotrwałych obserwacji o trudnym do przewidzenia wyniku powoduje, że ta metoda badań jest stosowana tylko w wyjątkowych przypadkach. Dostępne wyniki wskazują na możliwość jej wykorzystania przede wszystkim w obiektach posiadających wysokie wieże antenowe lub znajdujących się w obszarach o dużej aktywności burzowej [17, 20, 84, 116].

Obok badań rzeczywistych wyładowań piorunowych w obiekty budowlane, prowadzone są badania efektów oddziaływania wyładowań wywoływanych sztucznie z naturalnych chmur burzowych, tzw. wyładowań prowokowanych. Do wywoływania wyładowań piorunowych w dowolne miejsce obiektu wykorzystywane są niewielkie rakiety z dołączonymi do nich cienkimi przewodami, które wystrzeliwane są w kierunku rozwijającego się wyładowania doziemnego. Wskutek prądu płynącego w przewodzie następuje jego odparowanie i wytworzony zostaje kanał wyładowania [14, 47, 95, 96]. Szczegółowe wyniki analiz takich wyładowań wskazują jednak, że charakter zjawiska odpowiada bardziej kolejnym wyładowaniom głównym w kanale [14, 47, 96]. Metody te są również kosztowne, a badania prowadzone są zaledwie w kilku ośrodkach na świecie.

Wśród badań eksperymentalnych, których wyniki są wykorzystywane do analizy mechanizmów oddziaływania bezpośrednich wyładowań piorunowych, najbardziej powszechne i dostępne są metody wymuszania przepływu prądów udarowych symulujących prądy piorunowe w instalacjach analizowanych obiektów. Jako źródło prądu wykorzystywane są generatory wytwarzające prądy udarowe o wartościach szczytowych dochodzących do kilku kiloamperów [11, 25, 89, 94]. Najczęściej generator umieszczony jest na dachu lub na szczycie konstrukcji. Innym rozwiązaniem jest umieszczenie generatora na powierzchni ziemi w pewnej odległości od obiektu. Drogę powrotną prądu do generatora stanowi jeden lub więcej przewodów dołączonych najczęściej do systemu uziomów lub do pomocniczych elektrod umieszczonych w ziemi w pewnej odległości od obiektu. W czasie takich badań najczęściej wykonywane są pomiary rozprędy prądów udarowych w elementach konstrukcyjnych obiektu, pól elektromagnetycznych oraz napięć indukowanych w prostych układach przewodów wewnątrz obiektu. Zalecenia dotyczące prowadzenia badań z wykorzystaniem takich metod pojawiają się także w normach ochrony odgromowej typowych obiektów budowlanych [124] oraz obiektów telekomunikacyjnych [127].

Symulacyjne metody badań w rzeczywistych obiektach podlegają szeregu ograniczeniom technicznym prowadzącym niekiedy do znacznych uproszczeń i błędów, wśród których należy wymienić następujące:

- nieuwzględnienie wielu aspektów związanych z oddziaływaniem kanału wyładowania z prądem piorunowym;
- występowanie niezamierzonych sprzężeń od przewodów doprowadzających/ odprowadzających prąd udarowy do/z obiektu, które mogą zaburzać rozprędy prądów oraz wartości indukowanych przepięć [127];

- uzyskanie prądów udarowych o kształtach i wartościach szczytowych zbliżonych do rzeczywistych wymaga stosowania generatorów o dużych wartościach napięć [127].

W większości przypadków w czasie badań wymuszany jest przepływ prądów udarowych o niewielkich wartościach szczytowych, ale o kształcie zbliżonym do kształtu prądu pioruna u podstawy kanału wyładowania, np. do pomiarów pól magnetycznych wewnątrz obiektów budowlanych [124]. Prowadzone są również analizy odwrotne, w których generator udarowy dołączony jest do niewielkiej pętli umieszczonej wewnątrz obiektu. W takim przypadku dokonywane są pomiary prądów indukowanych w przewodzących elementach konstrukcji i instalacji piorunochronnej obiektu, co pozwala na wyznaczenie indukcyjności wzajemnej obu obwodów a następnie na przeprowadzenie analizy odwrotnej [88, 89].

Symulacyjne badania zjawisk występujących podczas wyładowań piorunowych prowadzone są także na modelach obiektów w warunkach laboratoryjnych. Badania takie wymagają zmiany kształtu i wartości prądu udarowego w tej samej skali, jaką zastosowano do budowy modelu obiektu, a także przeskalowania wartości indukcyjności, pojemności oraz przewodności [46, 86, 90, 122, 123]. W metodach takich oddziaływanie kanału wyładowania z prądem piorunowym jest odwzorowywane za pomocą przeskalowanego modelu, zwykle w postaci przewodu nawiniętego na izolacyjnym pręcie [43, 85]. Pojawiają się również próby odwzorowania wyładowania piorunowego za pomocą iskry wytworzonej pomiędzy dwoma elektrodami prętowymi [56]. Metody te wykorzystywane są głównie do szacowania wartości pól elektromagnetycznych oraz napięć indukowanych wewnątrz ekranowanych budynków, określania skuteczności ekranowania [122, 123] oraz do weryfikacji analitycznych lub numerycznych metod wyznaczania pól elektromagnetycznych i napięć indukowanych [46, 86, 90]. W badaniach takich dodatkowym ograniczeniem jest m. in. zaniechanie efektów związanych z właściwościami uziomów rzeczywistych obiektów. Metody badań symulacyjnych prowadzonych w warunkach laboratoryjnych na modelach obiektów, pozwalają na łatwą ich adaptację na przypadki różnych rozwiązań konstrukcji ekranujących czy systemów ochrony odgromowej. Jednak uogólnienie wyników tych badań na przypadki zjawisk zachodzących w naturalnych warunkach jest utrudnione lub wymaga wprowadzania daleko idących uproszczeń.

Obecnie coraz częściej stosowane są numeryczne metody analizy i oceny zagrożeń piorunowych. Są one szczególnie przydatne przy projektowaniu optymalnych rozwiązań systemów ochrony odgromowej. Wśród metod tych można wyróżnić trzy główne grupy: metody obwodowe, linii transmisyjnej oraz polowe.

W metodach obwodowych analizowana konfiguracja przedstawiana jest jako układ złożony z elementów o stałych skupionych lub rozłożonych umożliwiających uwzględnienie sprzężeń elektromagnetycznych i/lub zjawisk falowych [1, 92]. Podstawową niedogodnością tych metod jest konieczność wstępnego wyznaczenia (w sposób analityczny) wielkości wzajemnych sprzężeń elektromagnetycznych występujących pomiędzy wszystkimi elementami układu stanowiącego rozbudowaną sieć prostoliniowych cylindrycznych przewodów. Ze względu na jednoczesne występowanie silnych sprzężeń galwanicznych i indukcyjnych, jest to zadanie szczególnie skomplikowane w przypadku analizy rozbudowanych systemów uziomowych. Nawet w przypadku analiz układów składających się wyłącznie z elementów nadziemnych, zależność parametrów modelu obwodowego od częstotliwości zwykle nie jest brana pod uwagę. W konsekwencji metody obwodowe znajdują zastosowanie najczęściej do analiz relatywnie prostych konfiguracji umieszczonych w jednorodnych ośrodkach, zazwyczaj tylko geometrii nadziemnych przy pominięciu stratności gruntu lub tylko układów uziomowych [32, 33, 37]. Wzajemne sprzężenia pomiędzy nadziemnymi oraz podziemnymi elementami urządzeń piorunochronnych są pomijane.

Metody linii transmisyjnej były rozwijane pod kątem zastosowania do modelowania długich, prostoliniowych elementów przewodzących [36, 41, 54, 86], najczęściej poziomych w przypadku analiz systemów uziomowych [36, 54]. Metody te, podobnie jak metody obwo-

dowe, pozwalają na uwzględnienie także efektów wzajemnych sprzężeń elektromagnetycznych występujących pomiędzy poszczególnymi elementami modelowanej struktury [51]. Wielkości tych sprzężeń muszą być wyznaczone wstępnie w sposób analityczny, co powoduje, że metody te są jednak uciążliwe w zastosowaniu do przestrzennie złożonych konstrukcji. Modelowane konstrukcje umieszczone są najczęściej w ośrodkach jednorodnych a efekty wzajemnych oddziaływań pomiędzy elementami znajdującymi się nad ziemią oraz elementami zakopanymi są pomijane [51, 52].

Od pewnego czasu obserwuje się gwałtowny rozwój metod numerycznych opartych na teorii pola elektromagnetycznego, w których całkowite równania pola elektrycznego formułowane są w dziedzinie częstotliwości [1, 24, 35, 120, 139] lub w dziedzinie czasu [48, 87]. Równania rozwiązywane są numerycznie, najczęściej metodą momentów. Takie metody analiz umożliwiają przyjęcie bardziej rygorystycznych założeń dotyczących uwzględnienia wszystkich zjawisk elektromagnetycznych i niejednorodności środowiska w porównaniu z metodami obwodowymi czy metodami linii transmisyjnej. Są więc niezwykle elastyczne, pozwalają w naturalny sposób uwzględnić wzajemne sprzężenia pomiędzy elementami konfiguracji umieszczonymi w ośrodkach o różnych właściwościach elektrycznych, dzięki czemu analizowana konfiguracja złożona z części nadziemnych oraz zakopanych może być potraktowana całościowo [1, 140]. Jest to bardzo istotne, gdyż z jednej strony rozptył prądów w strukturze nadziemnej jest uwarunkowany umiejscowieniem i właściwościami systemu uzio- mów z drugiej - rozptył prądów w elementach uzio- mu zależy od geometrii struktury nad- ziemnej [64, 80].

W ostatnich latach podejmowane są próby analiz zjawisk falowych zachodzących w konstrukcjach wysokich obiektów trafionych przez wyładowania piorunowe. Otrzymywane wyniki wskazują, że w zależności od wysokości wieży oraz miejsca pomiaru prądu, efekty zjawisk falowych obserwowane w różnego typu konstrukcjach wież mogą stwarzać problemy przy statystycznej interpretacji wyników pomiarów parametrów prądów piorunowych oraz towarzyszących im pól elektromagnetycznych [38, 42, 45, 97]. Właściwe uwzględnienie efektów zjawisk falowych jest bardzo ważne także z punktu widzenia analiz numerycznych oddziaływania wyładowań piorunowych na systemy elektryczne i elektroniczne oraz oceny występujących zagrożeń. Prowadzone analizy teoretyczne uwzględniające zjawiska falowe, w większości przypadków dotyczą prostych konfiguracji, w których do reprezentacji wieży oraz kanału wyładowania wykorzystywane są odpowiednio model linii transmisyjnej w różnorodnych jego odmianach oraz tzw. inżynierskie modele wyładowania (włącznie z modelem linii transmisyjnej) [18, 99, 100, 104]. Analizy numeryczne wykorzystujące metody polowe, zwykle oparte są na założeniach upraszczających [4, 5, 48, 102, 119], które dla stosowanych metod, czy różnych modeli matematycznych wyładowania nie zawsze prowadzą do otrzymania podobnych wyników [102]. Prowadzenie analiz teoretycznych wymaga wcześniejszego oszacowania i wprowadzenia do modelu zbliżonych do rzeczywistych wartości parametrów charakteryzujących właściwości falowe układu trafiony obiekt-kanał wyładowania (impedancje falowe, współczynniki odbicia). Parametry te najczęściej muszą być wyznaczone eksperymentalnie [16, 18, 31, 45, 84] lub oszacowane na podstawie uproszczonych zależności [99].

1.2. Cel, teza i zakres pracy

Przedstawioną charakterystykę prowadzonych dotychczas badań oraz analiz zagrożenia piorunowego zmierzających do stworzenia odpowiedniej ochrony w obiektach trafionych przez wyładowanie, można podsumować następująco:

- Badania zagrożeń w obiektach budowlanych podczas naturalnych i prowokowanych wyładowań piorunowych podlegają ograniczeniom technicznym, ekonomicznym oraz

związanym z naturą zachodzących zjawisk. Dostępność wyników takich badań w literaturze jest ograniczona.

- Uogólnienie wyników badań naturalnych wyładowań piorunowych w obiekty budowlane, na przypadki obiektów innych typów oraz różnych rozwiązań ochrony odgromowej jest praktycznie niemożliwe.
- Wyniki symulacyjnych badań eksperymentalnych prowadzonych w obiektach budowlanych szczególnie rozpowszechnionych w latach 80, wykorzystywano tylko do analizy zagrożeń piorunowych badanych obiektów. Brak bardziej zaawansowanych metod numerycznych ograniczał możliwości ich adaptacji na przypadki uwzględniające rzeczywiste parametry prądów piorunowych czy różne rozwiązania ochrony odgromowej. Powyższe trudności spowodowały zahamowanie rozwoju tych metod.
- W symulacyjnych badaniach laboratoryjnych prowadzonych na modelach obiektów, obok kwestii związanych z uogólnieniem wyników na przypadki uwzględniające rzeczywiste parametry prądów wyładowań, pojawiają się problemy adaptacji wyników na przypadki odpowiadające rzeczywistym obiektom (rozmiary obiektu, właściwości uzioarów itp.). Badania modelowe podejmowane są więc głównie do weryfikacji metod i modeli numerycznych oraz fragmentarycznie w celach porównawczych np. właściwości ekranujących.
- Analizy numeryczne wykorzystujące metody obwodowe oraz linii transmisyjnej są najczęściej oparte na daleko idących nie do końca uzasadnionych uproszczeniach dotyczących konfiguracji i/lub parametrów modelu oraz właściwości elektrycznych ośrodków. Analizy takie mają więc charakter jedynie fragmentaryczny, a adaptacja wyników na przypadki rzeczywiste jest utrudniona.
- Analizy numeryczne wykorzystujące metody polowe pozwalają na całościowe ujęcie zagadnienia, z uwzględnieniem niemal wszystkich potencjalnie ważnych czynników i zjawisk elektromagnetycznych, co czyni te metody niezwykle atrakcyjnymi i elastycznymi.
- Badania eksperymentalne służące weryfikacji metod numerycznych opartych na teorii pola są podejmowane stosunkowo rzadko [11] lub mają charakter fragmentaryczny (najczęściej badania laboratoryjne). Tymczasem dokładność analiz numerycznych dla celów oceny zagrożenia piorunowego determinowana jest nie tylko dokładnością metody numerycznej, ale także dokładnością modeli: badanego obiektu, środowiska oraz wyładowania piorunowego. Brak jest dotychczas powiązania metod badań terenowych w rzeczywistych obiektach z zaawansowanymi metodami analiz numerycznych.
- Metody numeryczne bazujące na teorii pola elektromagnetycznego, w których uwzględniane są zarówno nadziemne jak i podziemne elementy konstrukcji i instalacji metalowych obiektów, są jeszcze stosunkowo rzadko wykorzystywane w analizach efektów oddziaływań wyładowań piorunowych czy zachodzących zjawisk falowych na systemy elektryczne i elektroniczne. Tymczasem metody te mogą być szczególnie użyteczne przy wyznaczaniu parametrów falowych układu trafiony obiekt-kanal wyładowania w sytuacjach, w których parametry te nie mogą być oszacowane eksperymentalnie.
- W normach ochrony odgromowej zalecane jest stosowanie zarówno prostych badań terenowych [124, 127] (np. do oceny skuteczności różnych rozwiązań ochrony odgromowej), jak również sugerowane wykorzystanie polowych metod numerycznych [127] do analiz efektów oddziaływania piorunowego impulsu elektromagnetycznego. Są to jednak zalecenia bardzo ogólne.

Powyższe przesłanki wskazują na potrzebę oraz możliwość powiązania eksperymentalnych badań terenowych prowadzonych w obiektach budowlanych z zaawanso-

wanymi metodami analiz numerycznych. Przyjęto założenie, że badania eksperymentalne powinny być stosunkowo proste i łatwe w realizacji oraz nie wymagać dużych nakładów finansowych.

W pracy zostanie szczegółowo przedstawiona analiza zagrożenia piorunowego stacji bazowych telefonii komórkowej. Wybór takich obiektów nie był przypadkowy i wynikał z następujących powodów:

- w ciągu ostatnich kilku lat wystąpił gwałtowny wzrost liczby stacji bazowych;
- rozmieszczenie oraz cechy konstrukcyjne stacji sprzyjające bezpośrednim wyładowaniom piorunowym w wieże;
- wyposażane stacji bazowych w urządzenia elektroniczne, których poziomy odporności udarowej od strony zasilania mogą być niższe [130] w porównaniu z poziomami odporności udarowej urządzeń powszechnego użytku [128] lub informatycznych [129];
- stwierdzanie uszkodzeń urządzeń w stacjach bazowych podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych pomimo stosowania w nich różnych środków ochrony odgromowej.

Wolnostojące stacje bazowe telefonii komórkowej można zatem uznać za jedne z najbardziej reprezentatywnych obiektów do prowadzenia analiz zagrożenia piorunowego urządzeń. Do dodatkowych czynników przemawiających za tym faktem należy zaliczyć następujące:

- są to obiekty stosunkowo niewielkie, dla których istnieje możliwość przeprowadzenia zarówno szczegółowych badań terenowych jak i analiz numerycznych z zastosowaniem modeli o różnym stopniu odwzorowania szczegółów konstrukcyjnych;
- wieże stacji są na tyle wysokie, by można było analizować w nich zjawiska falowe zachodzące dla kolejnych wyładowań piorunowych;
- badania przeprowadzone w stacjach bazowych mogą stanowić punkt wyjścia dla analiz większych czy bardziej rozbudowanych obiektów radiokomunikacyjnych.

Uwzględniając powyższe uwagi w pracy podjęto realizację następujących celów:

- Weryfikacji zastosowanych metod analizy zagrożenia piorunowego (badania terenowe i analizy numeryczne) oraz opracowania szczegółowych wytycznych ich stosowania w świetle proponowanego podejścia analizy eksperymentalno-teoretycznej. Analizy takie mają umożliwić ocenę stopnia zagrożenia piorunowego urządzeń oraz porównanie różnych rozwiązań ochrony odgromowej w rzeczywistych obiektach radiokomunikacyjnych.
- Opracowania wytycznych dotyczących budowy modeli numerycznych stacji (ich uproszczenia), pozwalających na efektywne prowadzenie analiz numerycznych oraz ocenę stopnia zagrożenia piorunowego urządzeń z zadawalającym przybliżeniem.
- Przeprowadzenie analizy wpływu rezystywności i struktury gruntu w modelu numerycznym na poziom zagrożenia piorunowego urządzeń w stacji.
- Zaproponowania modelu wyładowania piorunowego uwzględniającego najistotniejsze efekty oddziaływań pomiędzy kanałem wyładowania a trafionym obiektem oraz pozwalającego na realną ocenę stopnia zagrożenia piorunowego urządzeń.
- Oceny stopnia zagrożenia piorunowego urządzeń w wybranych typach stacji radiokomunikacyjnych.

W pracy, uwzględniając obecny stan wiedzy i dostępne narzędzia badawcze w dziedzinie analiz zagrożenia piorunowego oraz rysujące się na tym tle możliwości poszerzenia tego stanu wiedzy i rozwoju metod badawczych, postawiono następujące tezy:

- 1. W przypadkach niewielkich, wolnostojących stacji radiokomunikacyjnych, połączenie eksperymentalnych, łatwych do realizacji metod badań terenowych z zaawansowanymi metodami analiz numerycznych pozwala:**
 - z zadawalającym przybliżeniem ocenić poziom zagrożenia piorunowego urządzeń elektronicznych i elektrycznych podczas bezpośredniego wyładowania w wieżę stacji;
 - całościowo i we właściwy sposób uwzględnić przy ocenie zagrożenia piorunowego wszystkie najistotniejsze zjawiska elektromagnetyczne i falowe, które mogą zachodzić w stacji podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego;
 - sprawdzić komplementarność oraz wzajemnie zweryfikować metody badawcze zastosowane do analiz zagrożenia piorunowego.
- 2. Opracowane na podstawie analiz numerycznych weryfikowanych wynikami badań terenowych wytyczne dotyczące budowy modeli numerycznych, umożliwiają realną ocenę zagrożenia piorunowego urządzeń oraz opracowanie optymalnych rozwiązań ochrony odgromowej w podobnych typach obiektów wyłącznie na podstawie analiz numerycznych.**

W celu udowodnienia postawionych tez, w pracy założono połączenie metod badań terenowych w typowych wolnostojących stacjach bazowych telefonii komórkowej z metodami analiz numerycznych opartych na teorii pola elektromagnetycznego. Porównanie wyników badań terenowych oraz obliczeń, po weryfikacji przyjętych modeli i założeń, powinno dawać zbliżone wyniki. Jeśli tak, to kolejnym etapem jest uogólnienie tych wyników poprzez rozszerzenie zakresu analiz numerycznych oraz ocenę zagrożenia piorunowego.

Przy wyborze metod badawczych kierowano się przesłanką, że realna ocena zagrożenia piorunowego zależy od adekwatności i dokładności zastosowanych modeli: wyładowania, badanego obiektu oraz ośrodka, w którym ten obiekt się znajduje. Dlatego metody te powinny się wzajemnie uzupełniać i uzasadniać możliwość oceny zagrożenia w rzeczywistych obiektach przy uwzględnieniu rzeczywistych parametrów wyładowań.

Analiza zagrożenia piorunowego urządzeń w stacjach radiokomunikacyjnych będzie obejmowała wyznaczenie:

- rozptyłów prądów udarowych w elementach konstrukcji i instalacjach obiektu z uwzględnieniem prądów wpływających do zewnętrznej instalacji elektrycznej;
- różnic napięć pomiędzy elementami instalacji wyrównywania potencjałów oraz napięć wynoszonych przez systemy okablowania do interfejsów urządzeń;
- napięć i/lub prądów indukowanych w prostych układach przewodów.

W przypadku bezpośredniego wyładowania piorunowego w obiekt, podstawowe zagrożenie stwarza rozprzyskający się prąd piorunowy. Badania terenowe ograniczono więc do pomiarów prądów udarowych w przewodzących elementach konstrukcji i systemach wyrównywania potencjałów stacji. Przyjęto przy tym następujące założenia:

- metoda pomiarowa powinna być prosta, nie wymagająca użycia kosztownej aparatury pomiarowej oraz umożliwiająca szybkie przeprowadzenie pomiarów najlepiej w czasie normalnej pracy stacji;
- zadaniem pomiarów terenowych nie jest dokładne odwzorowanie zjawisk zachodzących podczas rzeczywistego wyładowania piorunowego, a jedynie doprowadzenie do rozprysku prądów udarowych w obiekcie;
- badania eksperymentalne napięciami i prądami udarowymi o wartościach szczytowych odpowiednio kilka kilowoltów i kilkadziesiąt – kilkaset amperów wykorzystywane są jedynie do weryfikacji modelu numerycznego stacji oraz modelu gruntu.

Wyniki badań terenowych są podstawą do tworzenia modeli numerycznych, w których można analizować zjawiska zachodzące podczas rzeczywistego wyładowania piorunowego.

Do celów symulacji numerycznych użyto oprogramowania, w którym całkowe równania pola elektrycznego rozwiązywane są w dziedzinie częstotliwości metodą momentów. Wybór metody uzasadniają:

- możliwość uwzględnienia niemal wszystkich zjawisk elektromagnetycznych towarzyszących wyładowaniu;
- uwzględnienie rzeczywistych parametrów gruntu oraz możliwość analizy konfiguracji składających się zarówno z elementów nadziemnych jak i zakopanych;
- możliwość analizy rozbudowanych konfiguracji przewodzących.

Realizując cele podjęte w pracy postępowano zgodnie z przedstawionymi poniżej etapami działania:

1. Pomiary terenowe rozplywu prądów udarowych w typowych wolnostojących stacjach bazowych telefonii komórkowej przy użyciu generatora napięć/prądów udarowych.
2. Weryfikacja modeli numerycznych wybranej stacji bazowej oraz przyjętych założeń dla przypadków odwzorowujących rzeczywiste warunki występujące podczas badań wybraną metodą pomiarową.
3. Przeprowadzenie obliczeń numerycznych przy założeniu innych warunków czy wariantów metody pomiarowej.
4. Analiza zjawisk zachodzących podczas rzeczywistego uderzenia pioruna w wieżę stacji oraz weryfikacja modelu numerycznego wyładowania piorunowego.
5. Przeprowadzenie obliczeń dla rzeczywistych parametrów prądu pioruna u podstawy kanału wyładowania oraz ocena zagrożenia piorunowego urządzeń w stacji bazowej.
6. Szacunkowa ocena zagrożenia piorunowego urządzeń w obiekcie innego typu.

Szczegółowe opisy sposobów realizacji powyższych etapów przedstawiono w rozdziałach 5, 6 oraz 7. Po każdym z tych etapów sformułowano i przedstawiono także szczegółowe wnioski dotyczące przebiegu jego realizacji oraz otrzymanych wyników.

2. Charakterystyka źródeł zagrożenia

Destrukcyjne skutki oddziaływania doziemnych wyładowań piorunowych na istoty żywe, obiekty budowlane oraz urządzenia elektryczne i elektroniczne są powszechnie znane. Dążenia do zapobiegania lub minimalizacji skutków tych oddziaływań doprowadziły do rozwoju badań nad naturą wyładowań atmosferycznych. Pierwszy znaczący wkład w dziedzinę ochrony odgromowej wniósł w XVIII wieku Benjamin Franklin. Jednak intensywny rozwój metod obserwacji zachodzących zjawisk oraz ich analiz teoretycznych dokonał się dopiero w XX wieku. Otrzymane wyniki umożliwiły bliższe poznanie właściwości oraz mechanizmów powstawania i rozwoju wyładowań atmosferycznych. Niestety, ciągle jeszcze wiele zachodzących zjawisk nie zostało dokładnie wyjaśnionych, a istniejące hipotezy wymagają weryfikacji.

W niniejszym rozdziale przedstawiono przegląd obecnego stanu wiedzy dotyczącego fizycznych podstaw powstawania i rozwoju wyładowań atmosferycznych oraz statystycznych parametrów prądu i prób reprezentacji głównego doziemnego wyładowania piorunowego w modelowaniu matematycznym zjawiska. Ograniczono się tylko do tych zagadnień, które są istotne z punktu widzenia wykorzystania ich w dalszej części pracy.

2.1. Fizyczne podstawy wyładowania

Wyładowanie atmosferyczne definiuje się jako chwilowy przepływ ładunku elektrycznego przez atmosferę na drodze rzędu kilometrów, charakteryzujący się dużą wartością natężenia prądu [117, 118]. Źródłem wyładowań atmosferycznych są ładunki elektryczne nagromadzone w chmurze burzowej. Ponad połowę wszystkich wyładowań stanowią wyładowania wewnątrz chmur burzowych, tj. pomiędzy poszczególnymi częściami chmury. Marginalny odsetek spośród wszystkich wyładowań stanowią wyładowania chmura-chmura oraz chmura-powietrze. Pozostała część wyładowań przypada na wyładowania pomiędzy chmurą burzową a ziemią, tzw. wyładowania doziemne, które stanowią główne źródło różnorodnych zagrożeń.

2.1.1. Powstawanie ładunku wewnątrz chmury burzowej

Częstość występowania burz zależy od szerokości geograficznej, struktury terenu, pory dnia oraz pory roku. Chmury burzowe powstają w wyniku procesów szybkiego wznoszenia się ciepłych wilgotnych mas powietrza. Ze wzrostem wysokości, w miarę jak temperatura otoczenia maleje, następuje schładzanie powietrza i skraplanie pary wodnej z wydzielaniem ciepła. Na wysokościach, na których temperatura otoczenia jest niższa niż 0 °C krople wody zaczynają zamarzać. W pewnym momencie obecne w powietrzu krople wody oraz drobiny lodu są zbyt ciężkie i zaczynają opadać. Następuje stopniowe spowolnienie procesu wznoszenia się powietrza, aż do jego przekształcenia w ruch zstępujący, dający początek opadom.

Podczas wznoszenia się mas powietrza zachodzą procesy prowadzące do przestrzennej separacji ładunków w chmurze burzowej. Istnieje wiele hipotez dotyczących mechanizmu elektryzacji chmury. Najbardziej popularne, mechanizm ten przypisują ładowaniu się kryształków lodu podczas ich krystalizacji. Krople wody zamarzają przy zetknięciu z krupą lodową

[44], a powstające naprężenia powodują wytworzenie mikroskopijnych, naładowanych dodatnio odprysków lodu. Wznoszące prądy powietrza unoszą lekkie odpryski lodu ku górze, natomiast ciężkie, naładowane ujemnie krupy lodowe pozostają.

W wyniku zachodzących procesów, duże centra ładunków dodatnich powstają w górnej części chmury (na wysokościach odpowiadających temperaturom od -5 °C do -40 °C), natomiast ładunek ujemny skoncentrowany jest w centrum i w dolnej części chmury (od 0 °C do -5 °C). Ładunki te są porównywalne i wynoszą od kilkudziesięciu do kilkuset kulombów. Blisko podstawy chmury znajduje się często dodatkowy obszar zawierający słaby, rzędu kilku kulombów, ładunek dodatni (0 °C) [53].

Przestrzenne rozdzielanie różnoimiennych ładunków wewnątrz chmury prowadzi do wytworzenia pól elektrycznych o dużych natężeniach oraz powoduje lokalną inwersję pola elektrycznego pomiędzy chmurą a ziemią, przy czym różnica potencjałów może osiągać wartości rzędu setek megawoltów [55].

2.1.2. Rozwój wyładowania

Lokalne przekroczenie natężenia pola elektrycznego wewnątrz chmury burzowej ponad wartość progową daje początek wyładowaniom wstępny [44]. Uważa się, że następuje to przy współdziałaniu jeszcze innych, nie do końca wyjaśnionych zjawisk zachodzących podczas separacji ładunków w chmurze. Rozwój wyładowań wstępnych pomiędzy centrami ładunków, tzw. centrami burzowymi [29], jest możliwy, jeśli wartości natężenia pola elektrycznego na ich czołach są wystarczające do jonizacji molekuł gazu. W warunkach przewagi centrów ładunków jednego znaku wyładowanie wstępne może rozwinąć się poza te centra i poza chmurę burzową w kierunku ziemi.

Rozwijające się w kierunku ziemi wyładowanie wstępne, zwane także wyładowaniem liderowym [29], ma postać strumienia ładunków. Strumień ten, nazywany liderem [29, 44] lub prekursorem [121], jonizuje powietrze na swej drodze, prowadząc do wytworzenia kanału wyładowania [29]. Kanał wyładowania składa się z silnie zjonizowanej plazmy, rozciągającej się wzdłuż drogi lidera w promieniu ok. 0,5 cm, otoczonej warstwą ładunku przestrzennego o grubości od kilku do kilkudziesięciu metrów. Lider porusza się w kierunku ziemi skokowo, z przeciętną długością kroku wynoszącą ok. 50 m oraz z odstępem czasu pomiędzy kolejnymi krokami ok. 50 μs [53]. W przerwie pomiędzy kolejnymi krokami lidera, część ładunku centrum burzowego spływa w utworzonym kanale w kierunku główki lidera. Ładunek ten rozkłada się wzdłuż kanału oraz powoduje lokalny wzrost natężenia pola elektrycznego przed czołem lidera, co prowadzi do kolejnego kroku lidera. Lokalne chwilowe zmiany natężenia pola elektrycznego oraz jonizacji powietrza wokół czoła lidera powodują, że nie porusza się on wzdłuż najkrótszej drogi, a kanał wyładowania jest silnie rozgałęziony. Ładunek zgromadzony w prawie całkowicie utworzonym kanale wyładowania kończącym się tuż nad ziemią wynosi ok. kilka kulombów i jest rozłożony równomiernie wzdłuż kanału [53].

W konsekwencji skokowego charakteru, wyładowanie liderowe rozwija się z prędkością ok. 300 km/s [53]. W miarę rozwoju wyładowania natężenie pola elektrycznego na powierzchni ziemi wzrasta. Gdy wartość pola lokalnie przekroczy wartość progową wytrzymałości powietrza, powstaje tzw. wyładowanie oddolne lub inaczej lider oddolny [29], tj. wyładowanie rozwijające się od powierzchni ziemi w kierunku czoła lidera odgórnego tworzące kanał zjonizowanego powietrza. Wyładowania oddolne tworzą się w miejscach, w których występuje zagęszczenie linii sił pola elektrycznego, takich jak wysokie wolno stojące drzewa, maszty i wieże radiokomunikacyjne, słupy sieci energetycznej i trakcyjnej, dzwonnice itp.

Po zetknięciu lidera oddolnego z liderem odgórnym lub, w przypadku jego braku, po zetknięciu czoła lidera odgórnego z ziemią, następuje proces gwałtownej neutralizacji ładunku zgromadzonego w kanale wyładowania. Proces ten charakteryzuje się nagłym wzrostem

prądu płynącego w kanale wyładowania, czemu towarzyszy zwiększenie jasności świecenia kanału. Jest to tzw. pierwsze wyładowanie główne. Wyładowanie to rozwija się z prędkością od 10 % do 50 % prędkości światła [29, 53], odprowadzając do ziemi (bezpośrednio lub przez obiekt, w który nastąpiło wyładowanie) ładunek zgromadzony w kanale. Impuls prądowy charakteryzuje się czasem narastania czoła rzędu kilku - kilkunastu mikrosekund, wartością szczytową średnio kilkadziesiąt kiloamperów (do setek kiloamperów), oraz wykładniczym opadaniem osiągając połowę wartości szczytowej po czasie ok. kilkadziesiątu - kilkuset mikrosekund [29]. Zwykle w krótkim czasie (ok. kilkadziesiątu milisekund) po pierwszym impulsie, wzdłuż tej samej drogi (bez rozgałęzień) schodzi następne wyładowanie wstępne, zwane wyładowaniem strzałowym [29] lub liderem ciągłym [121], prowadząc do powstania kolejnych wyładowań głównych [29].

Kolejne wyładowania główne w kanale, nazywane też wyładowaniami następnymi [133], powstają aż do rozładowania centrum ładunku. Centrum to może być sukcesywnie uzupełniane ładunkiem z sąsiednich centrów poprzez wyładowania wewnątrz chmury. Jeśli ładunek centrum burzowego nie zostanie uzupełniony w ciągu dostatecznie krótkiego czasu, kolejny lider ciągły może począwszy od pewnego miejsca zmienić się w lider krokowy poruszający się po tej samej lub innej drodze niż pierwszy lider krokowy lub też utworzony zostanie nowy kanał wyładowania wzdłuż całkowicie innej drogi [53]. W przerwie pomiędzy wyładowaniami impulsowymi w kanale wyładowania może płynąć tzw. prąd długotrwały [29], który jest w stanie odprowadzić ponad dwukrotnie więcej ładunku w porównaniu z wyładowaniem impulsowym [53]. Wyładowanie strzałowe rozwija się dopiero po zaniku przepływu prądu ciągłego. Czas pomiędzy kolejnymi składowymi wyładowania zawiera się w przedziale od 20 ms do 200 ms. Liczba wyładowań w kanale może dochodzić do ok. trzydziestu, jednak zwykle jest ich tylko dwa lub trzy [53].

2.2. Parametry prądu piorunowego

Do celów symulacji zagrożeń piorunowych przyjmuje się, że podczas wyładowania doziemnego prąd płynący w kanale składa się z:

- **prądów impulsowych** (pierwsze oraz następne wyładowania główne), charakteryzujących się dużą stromością narastania czoła (0,5 – 200 kA/μs), krótkim czasem do półszczytu (100 – 1000 μs) oraz dużą wartością szczytową (2 – 200 kA);
- **prądu długotrwałego**, mogącego pojawiać się w przerwach pomiędzy prądami impulsowymi; prąd ten może następować bezpośrednio po impulsie lub narastać powoli i charakteryzuje się czasem trwania do ok. kilkuset milisekund oraz wartością szczytową typowo od 30 do 500 A, maksymalnie do kilkadziesiątu kiloamperów [53].

Podstawowe parametry charakteryzujące prąd piorunowy wyładowania doziemnego to:

- wartość szczytowa I ;
- maksymalna stromość narastania czoła prądu piorunu $S_{\max} = (di/dt)_{\max}$;
- ładunek przenoszony przez udar $Q = \int i dt$;
- energia właściwa – energia wydzielona przez prąd piorunowy na rezystorze o jednostkowej rezystancji $W = \int i^2 dt$;
- czas narastania czoła T_1 i czas trwania do połowy wartości szczytowej na grzbiecie fali prądu piorunowego T_2 .

Ze względu na duże zróżnicowanie typów wyładowań, rozkładów ładunków w kanale wyładowania i w chmurze burzowej, warunków geograficznych, geologicznych i hydrologicznych, parametry prądów wyładowań piorunowych mogą być określane tylko w sensie statystycznym. Obecnie dostępnych jest wiele publikacji zawierających obszerne dane dotyczące charakterystycznych parametrów prądu piorunowego [12, 13, 16, 17, 101, 115]. Należy

jednak zauważyć, że w wielu przypadkach przedstawiane dane mogą być odnoszone tylko do konkretnych warunków, w których prowadzone były pomiary, w związku z czym zbyt szerokie ich uogólnianie w sensie statystycznym może być pozbawione podstaw [16, 45, 38].

Przykładowo, w pracy [38] pokazano, że zjawiska falowe zachodzące w obiekcie trafionym przez wyładowanie piorunowe mogą mieć istotny wpływ na przebiegi prądu pioruna wpływającego do obiektu oraz pól elektromagnetycznych towarzyszących wyładowaniu, nawet w przypadku obiektów o stosunkowo niewielkich wysokościach (10 m). Stwierdzono, że może to stawiać pod znakiem zapytania niektóre dane statystyczne dotyczące parametrów prądów piorunowych otrzymane na podstawie wyników pomiarów prądów wyładowań piorunowych w wieże o niewielkich (ok. 50 m) wysokościach.

Rozkłady prawdopodobieństw kilku podstawowych parametrów prądów piorunowych przedstawiono w normie ochrony odgromowej PN-IEC 61312-1 [133]. Norma ta ustala ponadto, że do celów symulacji należy przyjąć prąd pioruna składający się z:

- pierwszego udaru o biegunowości dodatniej lub ujemnej;
- udarów następnych o biegunowości ujemnej;
- udaru długotrwałego o biegunowości dodatniej lub ujemnej.

Dodatkowo w normie określono wartości parametrów charakteryzujących poszczególne składowe, odnosząc je do wymaganego poziomu ochrony obiektu. Wartości podstawowych parametrów charakteryzujących prądy piorunowe zestawiono w tabelicy 2.1.

Tablica 2.1. Wartości parametrów prądu piorunowego udarów pierwszego, następnego oraz długotrwałego w odniesieniu do wymaganego poziomu ochrony [133]

Parametry prądu piorunowego		Poziom ochrony		
		I	II	III-IV
Pierwsze wyładowanie główne	Wartość szczytowa prądu I (kA)	200	150	100
	Czas trwania czoła T_1 (μs)	10	10	10
	Czas trwania do półszczytu T_2 (μs)	350	350	350
	Ładunek udaru Q (C)	100	75	50
	Energia właściwa W/R (MJ/ Ω)	10	5,6	2,5
Wyładowanie następne	Wartość szczytowa prądu I (kA)	50	37,5	25
	Czas trwania czoła T_1 (μs)	0,25	0,25	0,25
	Czas trwania do półszczytu T_2 (μs)	100	100	100
	Średnia stromość I/T_1 (kA/ μs)	200	150	100
Udar długotrwały	Ładunek Q (C)	200	150	100
	Czas trwania T (μs)	0,5	0,5	0,5
	Średnia wartość prądu Q/T (A)	400	300	200

2.3. Modelowanie głównego wyładowania piorunowego

W ogólnym przypadku model wyładowania piorunowego powinien uwzględniać:

- wartość szczytową i kształt przebiegu prądu u podstawy kanału;
- sposób propagacji impulsu wzdłuż kanału;
- topologię kanału wyładowania.

Do najczęściej spotykanych w literaturze funkcji opisujących przebieg prądu u podstawy kanału wyładowania należą:

- **funkcja dwuwykładnicza** [1, 30, 33, 35, 54, 105]

$$i(0,t) = I \cdot \eta_1 \cdot [\exp(-\alpha \cdot t) - \exp(-\beta \cdot t)] \quad (2.1)$$

gdzie:

- I – wartość szczytowa prądu;
- η_1 – współczynnik korekcyjny wartości szczytowej;
- α, β – odwrotności stałych czasowych czoła i grzbietu udaru;
- t – czas;

- tzw. **funkcja Heidler'a** [15, 38, 39, 91, 92, 93]

$$i(0,t) = \frac{I}{\eta} \cdot \frac{(t/\tau_1)^n}{1+(t/\tau_1)^n} \cdot \exp(-t/\tau_2) \quad (2.2)$$

gdzie:

- I – wartość szczytowa prądu;
- η – współczynnik korekcyjny wartości szczytowej;
- τ_1, τ_2 – stałe czasowe odpowiednio czoła i grzbietu udaru;
- t – czas.

Funkcja dwuwykładnicza jest wyjątkowo prosta i całkowalna. Pozwala na otrzymanie prostej analitycznej transformaty Fourier'a. Wadą tej funkcji jest fakt, że prąd osiąga maksymalną stromość narastania czoła w momencie $t = 0$, co jest dużym uproszczeniem rzeczywistych zjawisk. Dodatkowo występują trudności z dokładnym odtworzeniem obu parametrów czasowych impulsu prądu pioruna (czasu narastania czoła oraz czasu do połowy wartości szczytowej) jednocześnie.

Funkcja Heidler'a pozwala na wystarczająco dokładne odtworzenie przebiegu prądu wyładowania zarówno w jego początkowym zakresie związanym z narastaniem czoła, jak i dla dłuższych czasów. Wadą tej funkcji jest brak prostej analitycznej transformaty Fourier'a.

Funkcja ta jest zalecana przez normy ochrony odgromowej [127, 133] do opisu matematycznego przebiegu prądu pioruna udarów pierwszego i następnych (tablica 2.2).

Tablica 2.2. Wartości parametrów występujących w równaniu (2.2) ($n = 10$), służące uzyskaniu zadanych kształtów udarów pierwszego i następnych [133]

Parametry	Poziom ochrony					
	Udar pierwszy			Udar następny		
	I	II	III-IV	I	II	III-IV
I (kA)	200	150	100	50	37,5	25
η	0,930	0,930	0,930	0,993	0,993	0,993
τ_1 (μ s)	19,0	19,0	19,0	0,454	0,454	0,454
τ_2 (μ s)	485	485	485	143	143	143

Należy nadmienić, że pojawiają się próby opracowania także innych funkcji, które pozwalałyby możliwie najwierniej odzwierciedlić typowe parametry prądu pioruna i byłyby pozbawione wspomnianych wad. W większości przypadków są one opisywane jako kombinacje składników występujących w równaniach (2.1) oraz (2.2) [10, 26, 40].

W niniejszej pracy do opisu prądu u podstawy kanału wyładowania wykorzystywano funkcję zalecaną przez normy ochrony odgromowej (równanie (2.2) dla $n = 10$) [127, 133]. W

ograniczonym stopniu w celu uproszczenia analiz, stosowano także funkcję dwuwykładniczą (rozdział 7.5).

W literaturze funkcjonuje obecnie wiele różnych modeli opisujących sposób propagacji impulsu prądu w kanale wyładowania. Wśród modeli wyładowania najczęściej stosowanych oraz najbardziej odpowiednich do analiz zagrożenia piorunowego, można wyróżnić dwie grupy [3, 7]:

- a) „modele inżynierskie”;
- b) „modele elektromagnetyczne”.

W modelu inżynierskim przebieg prądu w dowolnym punkcie wzdłuż kanału wyładowania opisywany jest analityczną funkcją czasu, wysokości tego punktu oraz przebiegu prądu u podstawy kanału. Określony w ten sposób rozkład prądu pioruna w kanale wyładowania pozwala na wyznaczenie pól elektromagnetycznych w różnych odległościach od miejsca wyładowania. W przyjmowanych założeniach możliwe jest także uwzględnienie różnych prędkości propagacji impulsu prądu wyładowania w kanale. Ze względu na przyjęte założenia dotyczące przebiegu prądu u podstawy kanału, modele inżynierskie można podzielić na dwie podgrupy [34]:

- 1) prąd u podstawy kanału uzależniony jest od potencjału ziemi, który determinuje ilość ładunku „wstrzykiwanego” do kanału w danej chwili czasowej, np. model Bruce’a-Golde’a, model linii transmisyjnej, zmodyfikowane modele linii transmisyjnej;
- 2) prąd u podstawy kanału w danej chwili czasowej determinowany jest ładunkiem zgromadzonym w kanale w fazie zstępowania lidera krokowego, a następnie odprowadzanym do ziemi w fazie wyładowania głównego, np. model Master’a-Uman’a-Lin’a-Standler’a, model wędrującego źródła prądowego (TCS – ang. Travelling Current Source), model Diendorfer’a-Uman’a czy modele Cooray’a.

Podsumowanie i porównanie podstawowych cech i założeń poszczególnych inżynierskich modeli wyładowania przedstawiono w pracach [21, 34].

Modele inżynierskie w większości przypadków znajdują zastosowanie do obliczeń pól elektromagnetycznych i napięć indukowanych w prostych układach przewodów oraz do szacowania parametrów prądu pioruna na podstawie rejestrowanych przebiegów pól elektromagnetycznych, najczęściej w znacznych odległościach od miejsca wyładowania [9, 18, 38, 91, 105, 114].

Przykładowo, w pracy [91] zastosowano zmodyfikowany model linii transmisyjnej, w którym impuls prądu pioruna przemieszczający się w górę kanału wyładowania jest eksponencjalnie tłumiony. Na podstawie przyjętego rozkładu prądu w kanale, wyznaczano pola elektromagnetyczne powstające wokół kanału przy uwzględnieniu stratności gruntu oraz napięcia indukowane w prostych układach napowietrznych linii elektroenergetycznych. Otrzymane przebiegi napięć porównywano z wynikami badań eksperymentalnych, naturalnych i prowokowanych wyładowań piorunowych. Porównano również oraz przedyskutowano wpływ poszczególnych inżynierskich modeli wyładowania na otrzymywane przebiegi napięć indukowanych w liniach. W analizach zaniebano zjawiska falowe. Zmodyfikowany model linii transmisyjnej wykorzystywano także w pracy [9] do wyznaczania napięć i prądów indukowanych przez piorunowy impuls elektromagnetyczny w prostych układach przewodów linii napowietrznych oraz podziemnych.

W ostatnich latach obserwuje się tendencję do rozbudowywania inżynierskich modeli wyładowania piorunowego na przypadki uwzględniające efekty zjawisk falowych zachodzących podczas uderzeń piorunów w wysokie obiekty [18, 19, 38, 105]. W pracach [18, 19, 38] rozbudowano model linii transmisyjnej poprzez uwzględnienie w równaniu opisującym rozkład prądu wzdłuż kanału wyładowania, obecności fal odbitych od wierzchołka oraz od podstawy wieży, przy założeniu określonych stałych wartości współczynników odbicia. Pokazano, że otrzymywane w takim przypadku wartości prądu pioruna wpływającego do wieży jak

również wytworzonych pól elektromagnetycznych, mogą być znacznie wyższe w porównaniu z przypadkami, w których zaniedbano zjawiska falowe. W pracach [18, 19] przedstawiono przykładowe wyniki analiz zależności wartości szczytowych pól elektromagnetycznych od wartości szczytowej prądu pioruna w wieży. Zależności wyznaczone za pomocą modelu linii transmisyjnej nie uwzględniającego oraz uwzględniającego zjawiska falowe porównano z wynikami pomiarów. W pracy [18] rozbudowano pod kątem uwzględnienia zjawisk falowych również inne inżynierskie modele wyładowania. Zaproponowano także metodę wyznaczenia wartości współczynników odbicia na podstawie przebiegów prądów piorunowych rejestrowanych w wysokich wieżach podczas naturalnych lub prowokowanych wyładowań piorunowych. W pracy [105] zastosowano zmodyfikowany model linii transmisyjnej, w którym uwzględniano nie tylko zjawiska falowe w wieży, ale także odbicia od czoła fali prądu wyładowania głównego poruszającej się w górę kanału.

W modelu elektromagnetycznym kanał wyładowania zastępowany jest strukturą złożoną z „cienkich przewodów” (rozdział 4), charakteryzującą się odpowiednimi wymiarami i parametrami elektrycznymi. Struktura taka może być rozbudowana o dodatkowe elementy skupione lub otoczona warstwą ośrodka o określonych właściwościach elektrycznych, co pozwala na uwzględnienie różnych prędkości propagacji i/lub określonych zmian kształtu impulsu prądu w kanale wyładowania [5, 87, 107, 119]. W założeniach najczęściej przyjmowany jest określony przebieg prądu źródła pobudzającego strukturę, zgodny z postulowanym przebiegiem prądu pioruna u podstawy kanału wyładowania. Rozkład prądu wzdłuż kanału wyznaczany jest natomiast numerycznie, przez rozwiązanie całkowych równań pola elektrycznego, sformułowanych na podstawie równań Maxwell’a. Do rozwiązania równań najczęściej wykorzystywana jest metoda momentów.

W modelu elektromagnetycznym, rozkład prądu w kanale wyładowania, odwzorowywanym za pomocą długiego cylindrycznego przewodu, przedstawia się podobnie, jak w modelu linii transmisyjnej. Jediną różnicą jest fakt, że w modelu elektromagnetycznym prąd jest dodatkowo tłumiony i zniekształcany w miarę jego przemieszczania się wzdłuż kanału [3, 8].

Pojawiają się również próby odgórnego przyjęcia w założeniach modelu, określonego rozkładu prądu wzdłuż całego kanału wyładowania, poprzez zastosowanie wielu punktowych źródeł prądu rozmieszczonych wzdłuż kanału. W takim modelu jednak, uwzględnianie wszystkich warunków brzegowych (na powierzchni długiego przewodu reprezentującego kanał wyładowania) wynikających z zachowania równań Maxwell’a, może prowadzić do otrzymania nierzeczywistych czy nieprzewidywalnych wyników [8, 145, 146].

Modele elektromagnetyczne wykorzystywane są do symulacji oddziaływań elektromagnetycznych pomiędzy kanałem wyładowania a innymi strukturami przewodzącymi, które można w przybliżeniu traktować jako sieci złożone z cienkich cylindrycznych przewodów (rozdział 4), np. wieże, obiekty budowlane, linie elektroenergetyczne, telekomunikacyjne itp. [4, 5, 87, 106, 107]. W modelach takich poszczególne segmenty sieci mogą być w przybliżeniu traktowane jako dipole elektryczne, jeśli spełnione są określone warunki dotyczące ich długości i średnicy.

W pracach [4, 5] do analiz numerycznych wykorzystywano program, w którym całkowite równania pola elektrycznego formułowane są w dziedzinie częstotliwości i rozwiązywane metodą momentów. W [4] kanał wyładowania reprezentowano pionową strukturą o wysokości 1500 m złożoną z prostoliniowych cylindrycznych przewodów, pomiędzy którymi szeregowo włączono skupione rezystancje i indukcyjności, w celu zmniejszenia prędkości propagacji głównego wyładowania piorunowego wzdłuż stratnego kanału. Model ten wykorzystywano do symulacji wyładowań piorunowych w wysokie wieże. Modelowany układ wieża-kanał wyładowania pobudzano ze źródła napięcia o impedancji wewnętrznej równej 400Ω , włączonego pomiędzy szczyt wieży a podstawę kanału. Przebieg napięcia źródła dobrano w taki sposób, aby otrzymać żądany kształt prądu pioruna u podstawy kanału. Wyznaczano pola

elektromagnetyczne wytwarzane wokół rzeczywistych wież, a wyniki analiz porównano z dostępnymi wynikami badań naturalnych wyładowań piorunowych w te obiekty. Z kolei w pracy [5] analizowano uderzenie pioruna w wieżę linii elektroenergetycznej. Celem analiz było określenie właściwości udarowych układu wieża-przewody linii napowietrznych. Kanał wyładowania reprezentowano za pomocą pionowego cylindrycznego przewodu o długości 480 m dołączonego do szczytu wieży. Układ pobudzany był z impulsowego źródła prądu o impedancji wewnętrznej równej $5 \text{ k}\Omega$, włączonego pomiędzy szczyt wieży a podstawę kanału lub pomiędzy dwa sąsiadujące segmenty kanału wyładowania na wysokości ok. 260 m nad wieżą. W obu pracach [4, 5] analizy prowadzono przy założeniu idealnie przewodzącej ziemi, a impedancje uziemienia wież modelowano poprzez włączenie pomiędzy wieżą a płaszczyznę ziemi skupionych rezystancji o wartościach 30Ω , 0Ω oraz 10Ω . W obu przypadkach w przebiegach prądów i napięć obserwowano efekty zjawisk falowych, które były wyraźnie uzależnione od przyjętych wartości impedancji uziemienia wież. Wartości impedancji uziemienia dobierano w taki sposób, aby przebiegi prądów w wieży były możliwie zbliżone do obserwowanych w naturalnych warunkach. Nie badano wpływu impedancji kanału wyładowania na obserwowane zjawiska falowe.

W zastosowanej w pracy [87] metodzie numerycznej całkowite równania pola elektrycznego sformułowane w dziedzinie czasu i rozwiązywane metodą momentów. Analizowano elektromagnetyczne efekty oddziaływania pobliskiego wyładowania piorunowego na stosunkowo rozległe instalacje napowietrznych linii elektroenergetycznych. Kanał wyładowania przedstawiano w postaci pionowego cylindrycznego przewodu pobudzanego ze źródła napięciowego o kształcie pozwalającym na uzyskanie żadanego kształtu prądu pioruna u podstawy kanału. Pomiedzy poszczególne segmenty tego przewodu włączano skupione rezystancje w celu otrzymania określonego rozkładu prądu wzdłuż kanału, zgodnego z rozkładem zakładanym dla zmodyfikowanego modelu linii transmisyjnej. Podobnie, jak w pracach opisanych powyżej, analizy dotyczyły idealnie przewodzącej ziemi.

Podobną metodę zastosowano w pracy [48], przy czym w tym przypadku nie starano się zapewnić zgodności rozkładu prądu w kanale wyładowania z którymkolwiek z modeli inżynierskich. Kanał wyładowania reprezentowano pionowym cylindrycznym przewodem o określonych parametrach elektrycznych, bez stosowania dodatkowych elementów skupionych. W pracy analizowano przypadek bezpośredniego wyładowania piorunowego w rzeczywistą wieżę o wysokości 553 m. Podstawę prowadzonych obliczeń stanowiły wyniki pomiarów prądów naturalnych wyładowań piorunowych w wieżę. W badaniach symulacyjnych układ wieża-kanał wyładowania pobudzano ze źródła napięcia włączonego pomiędzy wieżę a kanał. W celu właściwego uwzględnienia w analizach efektów zjawisk falowych, przeprowadzono wstępne obliczenia, na podstawie których wyznaczono przebieg napięcia źródła oraz impedancje wieży i kanału, niezbędne do prawidłowego odwzorowania przebiegu fali padającej prądu w wierzchołku wieży, zgodnego z uzyskanym z pomiarów. Otrzymane wyniki umożliwiły przeprowadzenie zasadniczych obliczeń rozkładu prądu w wieży i w kanale wyładowania oraz przebiegów pól elektromagnetycznych. Weryfikację wyników obliczeń stanowiły wyniki pomiarów pól elektromagnetycznych w odległości 2 km od wieży. Stwierdzono m. in., że dla takich odległości, wkład wnoszony przez prądy płynące w wieży w przebiegi całkowitych pól elektrycznego i magnetycznego, jest cztero-pięciokrotnie większy niż wkład wnoszony przez prąd płynący w kanale wyładowania.

W opisanych powyżej przypadkach [4, 5, 48, 87], elektromagnetyczny model wyładowania opiera się na teorii promieniowania (teorii anten). Struktura reprezentująca kanał wyładowania jest traktowana jako antena pionowa umieszczona nad ziemią i pobudzana ze źródła napięcia lub prądu, włączonego w obwód u podstawy kanału lub na pewnej wysokości ponad punktem uderzenia pioruna. Górny koniec takiej „anteny” jest otwarty, wystąpią więc odbicia od tego końca.

W pracach [106, 107, 119] stosowano elektromagnetyczny model wyładowania piorunowego, w którym kanał wyładowania zastąpiono pionowym cylindrycznym przewodem o określonych parametrach elektrycznych symulujących straty w rdzeniu kanału (obszar silnie zjonizowanej plazmy). W celu uwzględnienia w analizach obecności zewnętrznej warstwy ładunku przestrzennego wokół zjonizowanej plazmy, w pracy [119] rdzeń kanału otoczono dodatkowo warstwą ośrodka o mniejszej przewodności elektrycznej.

Analizowano napięcia powstające w liniach elektroenergetycznych niskich napięć na skutek pobliskich wyładowań piorunowych w ziemię [107] lub w wieżę stacji bazowej [106]. Badano m.in. wpływ wysokości zawieszenia linii, obecności urządzenia piorunochronnego, liczby przewodów odprowadzających, impedancji uziemiania wież, odległości umieszczenia zwodów w stosunku do przewodów fazowych, obciążenia włączonego pomiędzy przewody fazowe a neutralne, właściwości uziomu stacji bazowej, rezystywności gruntu.

Analizy numeryczne uwzględniające efekty zjawisk falowych zachodzących w wieżach trafionych przez wyładowania piorunowe przedstawiono w [119]. Badano wpływ fizycznych parametrów wyładowania, takich jak maksymalna stromość narastania czoła prądu wyładowania, straty występujące w rdzeniu kanału, grubość warstwy ładunku przestrzennego. Celem badań było m.in. określenie wpływu miejsca pomiaru prądu pioruna wzdłuż wieży na uzyskiwane wartości szczytowe prądów w przypadku stosunkowo niskich (ok. kilkudziesięciometrowych) oraz wysokich (kilkusetmetrowych) wież. W obu analizowanych przypadkach wież, o wysokościach 60 m i 250 m, wartości szczytowe prądów mierzonych w wierzchołku oraz u podstawy były do siebie zbliżone. Stwierdzono, że rozbieżności dotyczące średnich statystycznych wartości szczytowych prądów piorunowych, uzyskiwane na podstawie obserwacji naturalnych wyładowań piorunowych w relatywnie niskie (ok. kilkudziesięciometrowe) wieże zlokalizowane w różnych rejonach świata, nie powinny być przypisywane różnicom w miejscach pomiarów prądów wzdłuż wież.

W prowadzonych analizach [106, 119] stosowano idealne źródło prądu dołączone do układu wieża-kanał wyładowania w miejscu uderzenia pioruna na szczycie wieży lub w punkcie spotkania liderów odgórnego i oddolnego na wysokościach ok. 100 m nad wieżą. Prąd źródła wpływający do układu rozdzielał się na dwa impulsy: jeden poruszający się w górę, drugi – w dół kanału. W pracach nie opisano jednak szczegółowo założeń zastosowanego źródła prądu ani też nie podano, w jaki sposób zamknięto obwód prądu na szczycie kanału.

Do symulacji oddziaływań elektromagnetycznych pomiędzy kanałem wyładowania a analizowanym obiektem czy systemem, niekiedy stosowane jest połączenie modelu elektromagnetycznego z modelem inżynierskim. W takim przypadku model elektromagnetyczny wykorzystywany jest do reprezentacji wzajemnych oddziaływań pomiędzy poszczególnymi elementami badanego obiektu/systemu elektrycznego czy elektronicznego, natomiast oddziaływanie kanału wyładowania na elementy badanego obiektu/systemu odwzorowywane jest przy użyciu inżynierskiego modelu wyładowania, np.. modelu linii transmisyjnej [83, 121].

Istniejące modele matematyczne są w stanie uwzględnić szereg czynników oraz zjawisk fizycznych zachodzących w kanale wyładowania. Niestety, jak dotychczas niemożliwe jest stwierdzenie w sposób jednoznaczny, które z modeli najwierniej opisują rzeczywiste zjawiska fizyczne. Nie rozstrzygnięte do końca pozostają także kwestie obszarów czy granic stosowności poszczególnych modeli.

Przykładowo w pracy [8], na podstawie prowadzonych symulacji numerycznych wykazano, że w elektromagnetycznym modelu wyładowania niemożliwe jest uzyskanie nietłumionego i niezniekształcanego impulsu prądu w miarę jego przemieszczania się wzdłuż kanału nawet, jeśli wszystkie straty zostaną pominięte. Zjawisko to przypisano wzajemnym sprzężeniom elektromagnetycznym pomiędzy poszczególnymi częściami przewodu reprezentującego kanał wyładowania. Stwierdzono m. in., że inżynierskie modele wyładowania, w których

przyjmowany jest ściśle określony rozkład prądu w kanale, należy stosować bardzo ostrożnie gdyż mogą one nie odzwierciedlać rzeczywistych zjawisk.

W przypadku bezpośredniego wyładowania w wysoki obiekt, gdzie zachodzi konieczność uwzględnienia także rzeczywistych układów połączeń instalacji i elementów konstrukcji, stosowanie rozbudowanych modeli wyładowania o ściśle określonym rozkładzie prądu wzdłuż kanału jest problematyczne i kłopotliwe ze względu na niejednoznaczności w wyborze najwłaściwszego modelu oraz wymagania sprzętowe lub czas obliczeń. Z drugiej strony stosowanie rozbudowanych modeli wyładowania w takich przypadkach często mija się z celem, gdyż główne źródło zagrożenia stanowią rozprzyskujący się prąd pioruna oraz sprzężenia indukcyjne pomiędzy elementami konstrukcji i instalacji obiektu. Z tego punktu widzenia, dokładne odwzorowanie zjawisk fizycznych zachodzących w kanale wyładowania jest ważne o tyle, o ile ma istotny wpływ na przebieg prądu u podstawy kanału.

W związku z powyższym, w pracy nie uwzględniano wszystkich czynników związanych ze sposobem propagacji prądu wzdłuż kanału wyładowania. Skupiono się na właściwym odwzorowaniu przebiegu prądu pioruna u podstawy kanału. W tych przypadkach, w których nieuwzględnienie w analizach obecności kanału wyładowania mogło mieć istotny wpływ na przebieg prądu u podstawy kanału stosowano prosty elektromagnetyczny model wyładowania.

2.4. Analiza ryzyka uszkodzenia instalacji i urządzeń w wyniku wyładowań piorunowych w wieżę stacji radiokomunikacyjnej

Zagrożenia stwarzane przez wyładowania atmosferyczne związane są z jednej strony z częstością występowania wyładowań na danym terenie, z drugiej z właściwościami obiektu oraz urządzeń i instalacji w nim pracujących i/lub z nim połączonych, w które lub w pobliżu których wystąpiło wyładowanie.

Miarą zagrożenia piorunowego oraz skuteczności zastosowanych środków ochrony odgromowej jest ryzyko spodziewanych szkód R . W obiektach wyposażonych w środki ochrony odgromowej jest ono zwykle znacznie mniejsze od jedności. W takich przypadkach ryzyko powstania szkody może być wyznaczone z przybliżonej zależności [22, 27, 28, 57, 125]:

$$R = N \cdot P \cdot L \quad (2.3)$$

gdzie:

- N – średnia roczna liczba wyładowań oddziałujących na obiekt, urządzenia oraz dochodzące do niego instalacje;
- P – prawdopodobieństwo wywołania przez pojedyncze wyładowanie określonej szkody lub zakłócenia nie tolerowanego przez urządzenia lub instalacje pracujące w obiekcie;
- L – współczynnik pozwalający oszacować rozmiary powstałej szkody.

Szczegółową metodykę analizy oraz oceny uszkodzeń powodowanych przez wyładowania piorunowe zawiera norma ochrony odgromowej IEC 62305-2 [125]. Zgodnie z koncepcją przyjętą w tej normie, ryzyko całkowite dla danego przypadku szkody lub straty jest sumą odpowiednich komponentów, z których każdy może być wyznaczony z zależności (2.3). Poszczególne komponenty ryzyka są ukierunkowane na określone przyczyny szkód, typy szkód oraz rodzaje strat.

Analizę i ocenę ryzyka strat wywołanych przez wyładowania piorunowe przeprowadzono dla analizowanej w pracy wolnostojącej stacji bazowej telefonii komórkowej GSM.

Na podstawie dostępnych danych [111] przyjęto średnią liczbę dni burzowych w roku dla obszaru Polski równą $T_d = 20$. Przeciętna gęstość wyładowań doziemnych [132] w rozpatrywanym przypadku wynosi $N_g = 1,7$ wyładowania / km² / rok.

W prowadzonej analizie przyjęto następujące założenia dotyczące analizowanej stacji:

- wymiary obiektu (wraz z ogrodzeniem): 11 m x 18 m, wysokość kontenera 3,5 m, wysokość wieży 60 m;
- obiekt pojedynczy, brak innych obiektów w jego otoczeniu, teren wiejski;
- zasilanie linią kablową podziemną, z transformatora oddalonego o ok. 200 m od obiektu;
- III poziom ochrony;
- automatyka przeciwpożarowa w kontenerze;

Ponieważ wysokość stacji jest znacznie większa w porównaniu z jej wymiarami poziomymi, równoważną powierzchnią zbierania wyładowań A_d określono posługując się następującą zależnością przybliżoną [125]:

$$A_d \approx 9 \cdot \pi \cdot H^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.4)$$

gdzie: H – wysokość wieży w [m].

Błąd wynikający z tego przybliżenia jest pomijalnie mały.

Trzeci poziom ochrony odgromowej przyjęto przy założeniu akceptowanej rocznej częstości wyładowań piorunowych $N_c = 10^{-2}$ [132]. Wyniki wszystkich obliczeń numerycznych przedstawione w dalszej części pracy również dotyczą III poziomu ochrony. W przypadku przyjęcia ostrzejszych kryteriów dotyczących akceptowanej rocznej częstości wyładowań ($N_c = 10^{-3}$), konieczne może być przyjęcie parametrów prądu pioruna odpowiadających I lub II poziomowi ochrony. Przedstawione w pracy przebiegi prądów i napięć wymagają wówczas jedynie odpowiedniego przeskalowania (tablica 2.1).

Wyniki analizy ryzyka uszkodzenia urządzeń i instalacji technicznych, ukierunkowane na poszczególne rodzaje strat przedstawiono w tablicy 2.3. Otrzymane dla analizowanego przypadku wartości ryzyka mieszczą się w granicach ryzyka tolerowanego.

Tablica 2.3. Wyznaczone wartości ryzyka ukierunkowanego na poszczególne rodzaje strat dla stacji bazowej GSM oraz ryzyko tolerowane

Rodzaj straty	Wartość ryzyka	Tolerowane ryzyko strat wg IEC 62305-2
Typ 1. Utrata życia ludzkiego	9,62 E-07	1,00 E-05
Typ 2. Utrata podstawowych usług	3,72 E-04	1,00 E-03
Typ 3. Utrata dóbr kulturalnych	0,00 E+00	1,00 E-03
Typ 4. Straty materialne	4,51 E-05	1,00 E-03

3. Charakterystyka urządzeń piorunochronnych oraz systemów zasilania w obiektach radiokomunikacyjnych

Biorąc pod uwagę podstawowe czynniki decydujące o poziomie ryzyka powstawania uszkodzeń powodowanych przez bezpośrednie wyładowania piorunowe, obiekty radiokomunikacyjne można klasyfikować ze względu na:

- wielkość obiektu budowlanego (różnej wielkości budynki telekomunikacyjne, małe bezobsługowe stacje bazowe itp.);
- wysokość konstrukcji nośnej anten;
- typ konstrukcji nośnej anten (np. wieże stalowe, maszty z izolowanymi odciegami);
- usytuowanie wież lub masztów (np. na ziemi lub na dachach budynków);
- usytuowanie obiektu (na terenie wiejskim, podmiejskim lub miejskim).

W niniejszej pracy analizowano obiekty radiokomunikacyjne o szczególnie dużym zagrożeniu piorunowym, w których anteny nadawczo-odbiorcze usytuowane są na wieżach o stalowych konstrukcjach ustawianych bezpośrednio na fundamentach wkopanych w ziemię. Ograniczono się do najczęściej występujących wież o wysokościach 40 – 60 m.

3.1. Konfiguracje urządzeń piorunochronnych

Urządzenie piorunochronne, zwane także systemem ochrony odgromowej, instalacją odgromową lub instalacją piorunochronną (LPS), składa się w ogólnym przypadku z zewnętrznego oraz wewnętrznego urządzenia piorunochronnego.

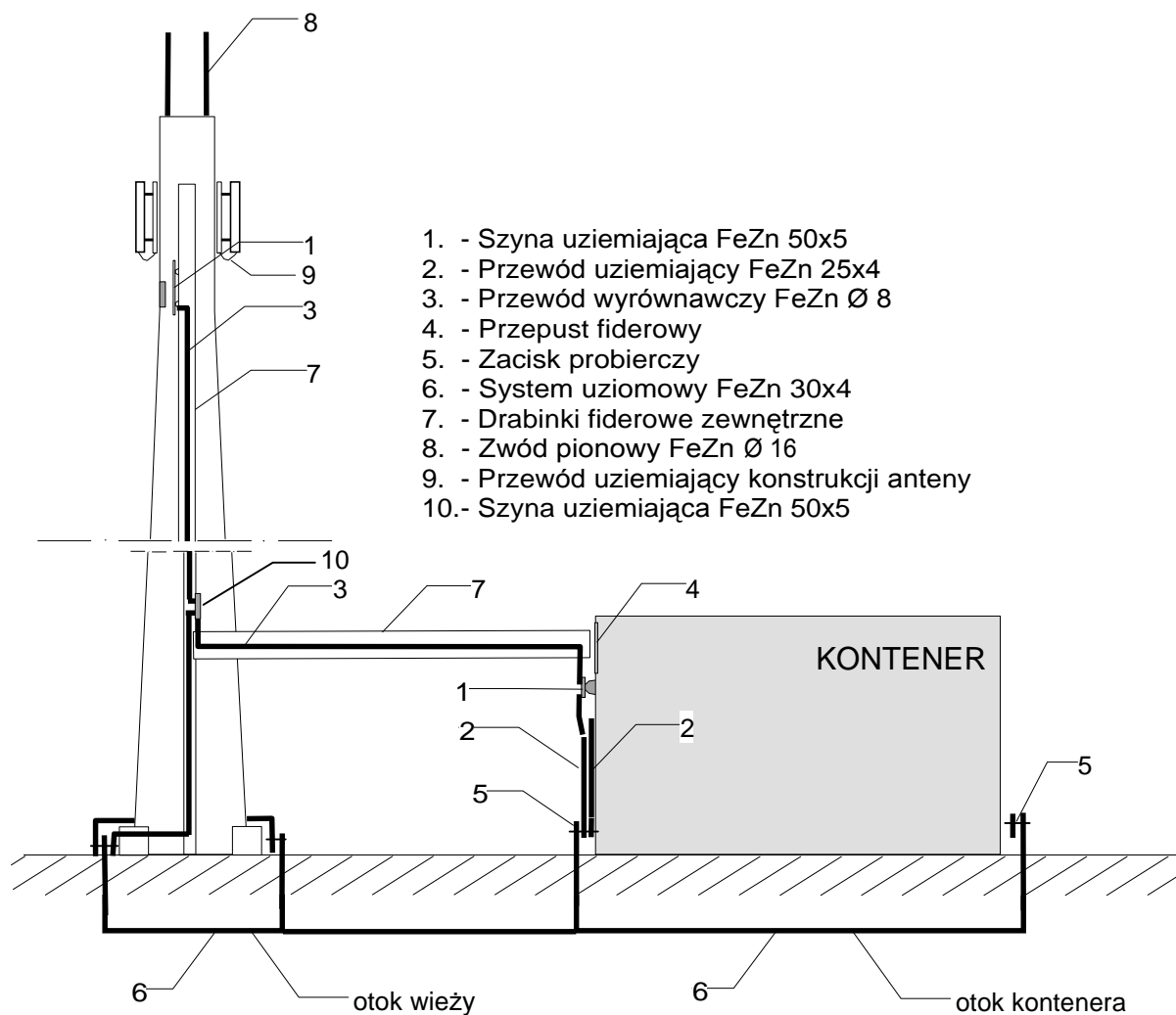
3.1.1 Zewnętrzne urządzenie piorunochronne

Zewnętrzne urządzenie piorunochronne obiektu budowlanego ma postać sieci galwanicznie połączonych ze sobą przewodów, taśm i/lub prętów oplatających chroniony obiekt.

W przypadku wież antenowych o konstrukcjach przewodzących, urządzenie to jest wykonane jako nieizolowane od przestrzeni chronionej. Składa się najczęściej z jednego lub kilku zwodów pionowych umieszczonych na szczycie wieży lub na konstrukcjach mocujących poszczególne anteny (rys. 3.1). Przewodząca konstrukcja wieży stanowi w takim przypadku naturalną drogę odprowadzania prądu pioruna od zwodów do systemu uziemień. Zwykle wzdłuż wieży poprowadzony jest dodatkowy przewód, który łączy szyny wyrównawcze na szczycie wieży, szynę uziemiającą u jej podstawy oraz system uziemień (rys. 3.2). Przewód ten może być łączony do konstrukcji wieży (co kilka - kilkanaście metrów) lub może być od niej izolowany (za wyjątkiem połączeń do szyn wyrównawczych i uziemiających, które zwykle mają połączenie z konstrukcją wieży). Dla odróżnienia od innych przewodów wyrównawczych, w dalszej części pracy przewód ten będzie nazywany przewodem odprowadzająco-wyrównawczym.



Rys. 3.1. Przykłady zwodów stosowanych do ochrony anten



Rys. 3.2. Przykładowy schemat zewnętrznej instalacji piorunochronnej stosowanej w stacjach GSM

Do ochrony odgromowej obiektu budowlanego wykorzystywane są naturalne przewodzące elementy konstrukcyjne lub instalowane dodatkowe przewody służące wyłącznie do odprowadzania prądów piorunowych [131]. Części składowe budowli wykorzystywane jako naturalne elementy zewnętrznego urządzenia piorunochronnego, powinny spełniać odpowiednie wymagania odnośnie ich wymiarów, właściwości elektrycznych i bezpieczeństwa oraz zapewniać ciągłość galwaniczną.

Systemy uziomowe obiektów radiokomunikacyjnych zwykle nie występują w czystej postaci uziomów typu A (promieniowych lub pionowych elektrod uziemiających) lub B (uziomów otokowych), lecz stosowane są różne ich kombinacje. Najczęściej są to pojedyncze lub wielokrotne uziomy otokowe w połączeniu z uziomami promieniowymi oraz uziomami fundamentowymi.

W przypadku stacji bazowych GSM uziemienia występują najczęściej w postaci otoków wokół wieży i kontenera (rys. 3.2) oraz otoku wokół całej stacji ułożonego wzdłuż jej ogrodzenia. Niekiedy wykonuje się także otoki wokół poszczególnych stóp fundamentowych wieży. Otoki łączone są przy pomocy poziomych elektrod uziemiających. Preferowane jest wykonanie dodatkowych połączeń w postaci uziomów promieniowych lub dodatkowych otoków, rzadziej natomiast stosowane są uziomy pionowe.

Uziomy poziome układane są na głębokości ok. 60 – 80 cm. Zewnętrzne uziomy otokowe zakopuje się w odległości ok. 1 – 1,5 m od ścian budynku lub kontenera. Uziomy pionowe (o długości min. 2,5 m) umieszcza się w gruncie w taki sposób, aby wierzchołek uziomu znajdował się na głębokości nie mniejszej niż 80 cm.

3.1.2 Wewnętrzne urządzenie piorunochronne

Wewnętrzne urządzenie piorunochronne stanowi zespół dodatkowych środków pozwalających na zredukowanie elektromagnetycznych efektów prądu piorunowego wewnątrz chronionej przestrzeni [131]. Zasadniczym elementem wewnętrznego urządzenia piorunochronnego jest wspólny system wyrównywania potencjałów (CBN – ang. Common Bonding Network) [126, 137], określane też jako wspólny system uziemiający [133].

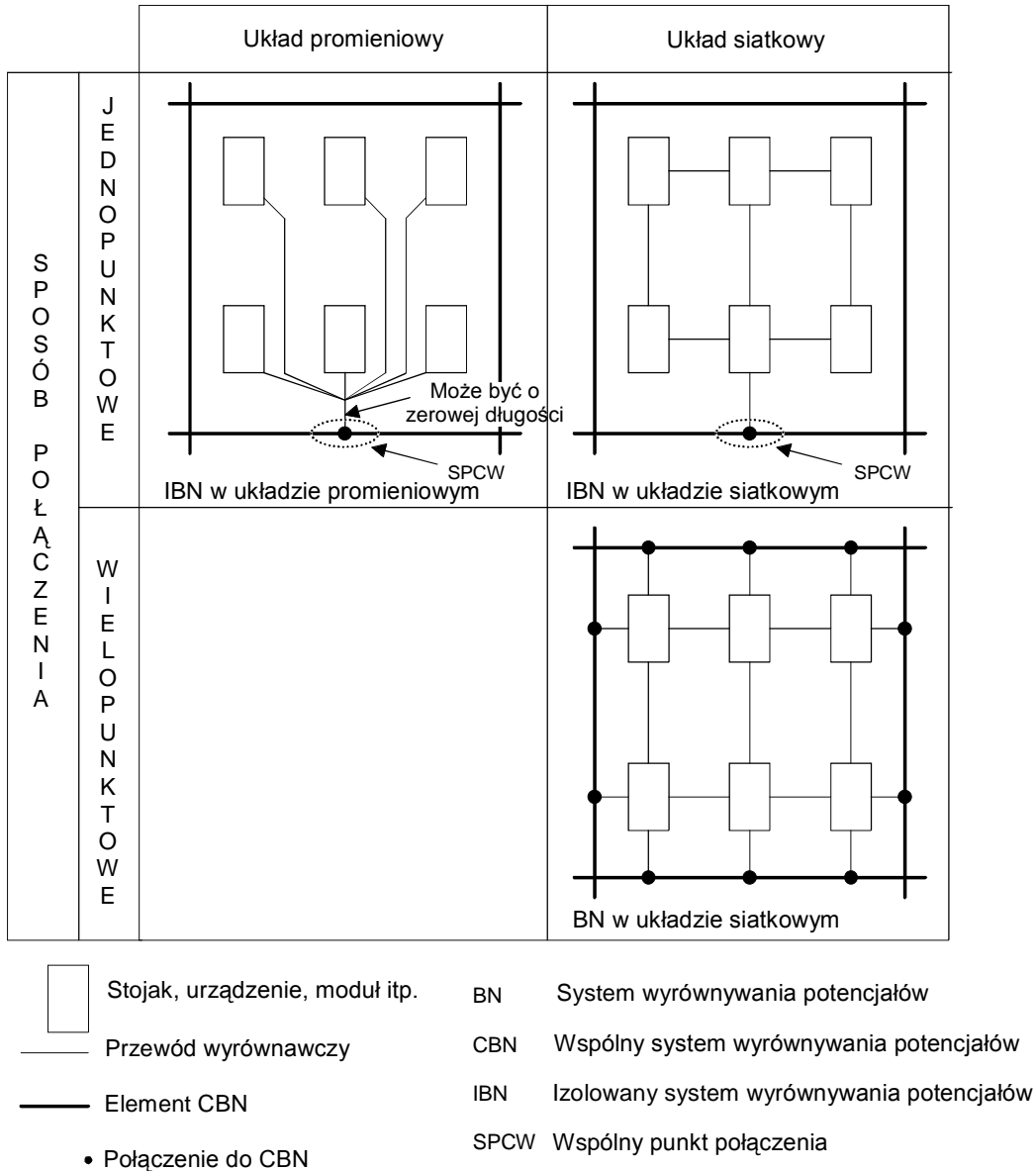
Wspólny system wyrównywania potencjałów powinien zapewnić ochronę ludzi oraz urządzeń przed skutkami zakłóceń elektromagnetycznych o szerokim widmie częstotliwości oraz stwarzać drogę dla prądów zwarć w instalacjach zasilających [126]. Podstawowe cechy tego systemu to:

- połączenie wszystkich elementów systemu przy pomocy jak największej liczby przewodów wyrównawczych, w układzie siatkowym;
- połączenie wspólnego systemu wyrównywania potencjałów z główną szyną uziemiającą;
- pożądane jest wprowadzenie wszystkich instalacji przewodzących oraz linii zasilających i sygnałowych do budynku możliwie blisko siebie oraz blisko miejsca zainstalowania głównej szyny uziemiającej;
- odpowiednie prowadzenie okablowania wewnątrz stref chronionych (z dala od elementów wspólnego systemu wyrównywania potencjałów i innych przewodów wiodących prąd piorunowy lub ułożenie w metalowych ekranach).

Zgodnie z zasadami strefowej koncepcji ochrony, wyrównywanie potencjałów jest wymagane także w miejscach, w których instalacje metalowe przekraczają granice stref ochronnych oraz wewnątrz poszczególnych stref ochronnych.

Wyrównywanie potencjałów poszczególnych urządzeń w obiekcie radiokomunikacyjnym może być zrealizowane w systemie izolowanym lub nieizolowanym względem wspólnego systemu wyrównywania potencjałów. Poszczególne urządzenia lub grupy urządzeń danego systemu mogą być połączone względem siebie w układzie promieniowym lub siatkowym (rys. 3.3). W przypadku izolowanego systemu wyrównywania potencjałów urządzenia (IBN –

ang. Isolated Bonding Network), jest on przyłączony do wspólnego systemu wyrównywania potencjałów w jednym punkcie (SPCW – ang. Single Point Connection Window). W przypadku systemu nieizolowanego, jest on przyłączony do wspólnego systemu wyrównywania potencjałów w wielu punktach przy pomocy wielu przewodów wyrównawczych. Podstawowe układy połączeń przedstawiono na rys. 3.3 [126].

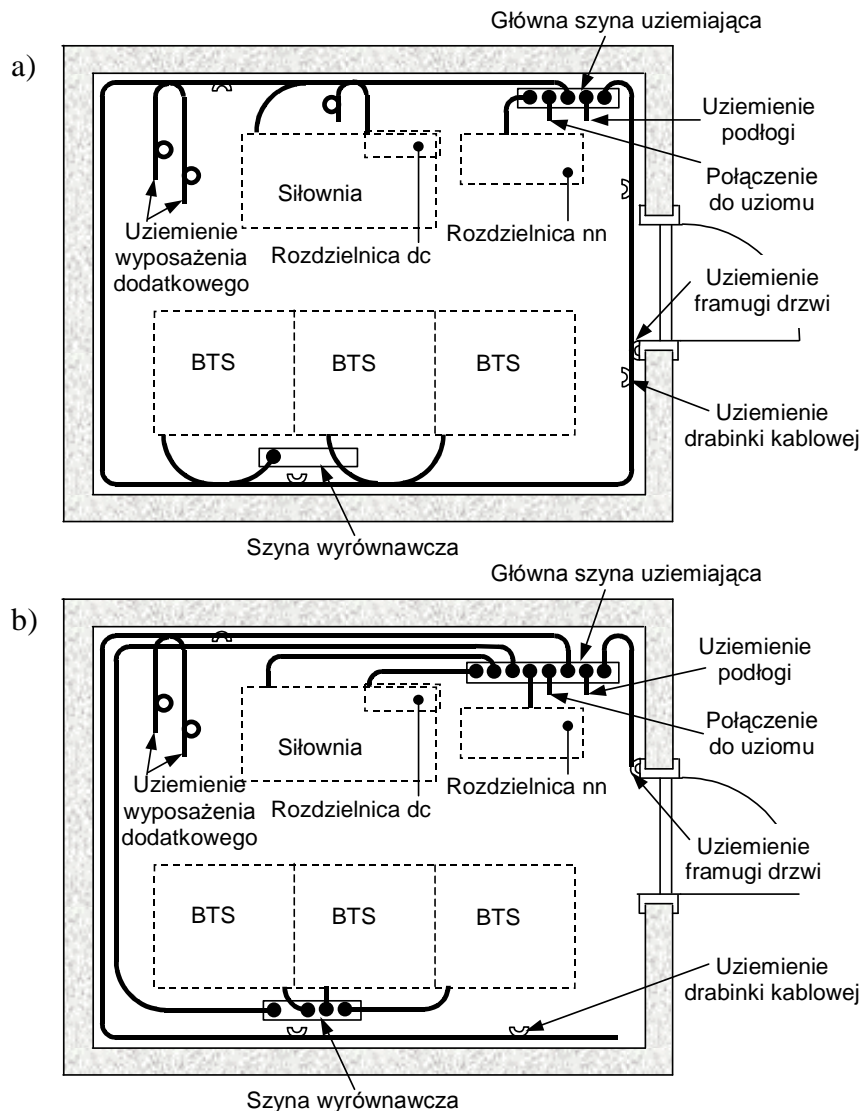


Rys. 3.3. Podstawowe układy połączeń systemów wyrównywania potencjałów urządzeń w obiekcie względem wspólnego systemu wyrównywania potencjałów [126]

W zależności od typu obiektu oraz rodzaju wyposażenia stosowane są różne kombinacje układów połączeń przedstawionych na rys. 3.3. Część urządzeń może być połączona w układzie promieniowym a część w układzie siatkowym izolowanym lub nieizolowanym od wspólnego systemu wyrównywania potencjałów. Odrębne sposoby konfiguracji stosowane są zwykle dla urządzeń lub grup urządzeń służących utrzymaniu zasadniczych usług telekomunikacyjnych oraz dla wyposażenia dodatkowego.

W przypadku stacji bazowych GSM, do budowy wspólnego systemu wyrównywania potencjałów wykorzystywany jest zwykle przewód (płaskownik) umieszczony wewnątrz kontenera na wysokości ok. 1,6 m nad podłogą. Przewód ten (taśma, płaskownik) może być uło-

żony na wszystkich czterech ścianach kontenera lub tylko na trzech ścianach (rys. 3.4 a) i b)). W dalszej części pracy przedstawione rozwiązania nazywane są systemami z zamkniętym i otwartym pierścieniem wyrównawczym [134].



Rys. 3.4. Przykładowe konfiguracje systemów wyrównywania potencjałów w kontenerze stacji bazowej: a) pierścień zamknięty; b) pierścień otwarty

W konfiguracji pierścienia zamkniętego (rys. 3.4 a)), zazwyczaj wszystkie urządzenia w kontenerze łączone są do tego pierścienia w miejscach najbliższych ich usytuowaniu tworząc system wyrównywania potencjałów w układzie siatkowym. Konfiguracja z pierścieniem otwartym (rys. 3.4 b)) jest zwykle konfiguracją mieszaną, w której urządzenia służące utrzymaniu zasadniczych usług, takie jak urządzenia stacji bazowej (BTS), siłownia, czy rozdzielnica nn, są przyłączone każde z osobna bezpośrednio do głównej szyny uziemiającej (układ promieniowy), natomiast urządzenia wyposażenia dodatkowego, np. radiolinia, modem, centrala alarmów, są dołączone do pierścienia wyrównawczego w miejscach najbliższych ich usytuowaniu.

Kontener wykonany jest najczęściej w całości z blaszanych paneli, rzadziej ze zbrojonego betonu. Jest on zwykle łączony do uziemienia w dwóch miejscach: razem z główną szyną uziemiającą oraz z szyną uziemiającą znajdującą się przy przepustach kablowych.

3.2. Zasilanie w obiektach radiokomunikacyjnych

Zgodnie z zaleceniami norm telekomunikacyjnych [126, 135] zasilanie w prąd przemienny powinno być zrealizowane w systemie TN-S. Niezależnie od systemu sieci dochodzących do obiektu, przekształcenie w system TN-S powinno odbywać się w miejscu wprowadzenia sieci do obiektu. W przypadku doprowadzenia do obiektu sieci systemu TN-S lub TN-C odpowiednio przewód ochronny lub przewód ochronno-neutralny połączone są z główną szyną uziemiającą. Doprowadzenie sieci systemów TT lub IT do obiektu wymaga poprowadzenia w obiekcie przewodu ochronnego od głównej szyny uziemiającej lub wymagane jest stosowanie transformatora separującego [126]. W każdym z przedstawionych systemów stosowane są urządzenia ograniczające przepięcia.

Zasilanie urządzeń w prąd stały realizowane jest przy pomocy scentralizowanego systemu zasilania (najczęściej napięciem 48 V), w którym biegun dodatni jest przyłączony do wspólnego systemu wyrównywania potencjałów. Żyłka kabla zasilającego urządzenie przyłączona do bieguna dodatniego systemu zasilania, funkcjonuje jako przewód powrotny. Możliwe są różne rozwiązania połączenia przewodów powrotnych instalacji zasilającej prądu stałego względem systemów wyrównywania potencjałów. Jeśli sieć przewodów powrotnych połączona jest z danym systemem wyrównywania potencjałów tylko w jednym punkcie, taki system zasilania nazywany jest systemem z izolowanym przewodem powrotnym w stosunku do rozpatrywanego systemu wyrównywania potencjałów. W przypadku połączenia wielopunktowego mówi się o systemie ze wspólnym przewodem powrotnym [126].

Najczęściej spotykane, typowe rozwiązania systemów zasilania w prąd stały to:

- system ze wspólnym przewodem powrotnym w stosunku do wspólnego systemu wyrównywania potencjałów;
- system ze wspólnym przewodem powrotnym tylko w stosunku do izolowanego systemu wyrównywania potencjałów.

3.3. Podsumowanie

Badania terenowe oraz analizy numeryczne prowadzono dla stacji bazowych GSM wyposażonych w zewnętrzne urządzenie piorunochronne, którego schemat przedstawiono w ogólnej postaci na rys. 3.2. We wszystkich analizowanych stacjach bazowych wykorzystywany jest system wyrównywania potencjałów w postaci otwartego pierścienia opasującego trzy ściany kontenera (rys. 3.4 b)).

Zewnętrzna instalacja zasilająca w prąd przemienny zrealizowana jest linią kablową zakopaną ze stacji transformatorowej znajdującej się w odległości od kilkudziesięciu do kilkuset metrów od obiektu.

Szczegółowe opisy rozwiązań oraz indywidualne różnice w instalacjach poszczególnych stacji zamieszczono w dalszych rozdziałach pracy przy przedstawieniu wyników badań.

Za kryterium oceny zagrożenia urządzeń przyjęto spadki napięć powstające wzdłuż elementów systemów wyrównywania potencjałów oraz napięcia wynoszone do interfejsów urządzeń poprzez elementy systemów okablowania zasilającego i/lub sygnałowego. Szczególną uwagę zwrócono na spadek napięcia powstający pomiędzy główną szyną uziemiającą w kontenerze (rys. 3.4) a szyną uziemiającą przy przepustach na kontenerze (rys. 3.2).

4. Teoretyczne podstawy analiz numerycznych

Urządzenia piorunochronne, systemy okablowania oraz inne instalacje metalowe znajdujące się wewnątrz lub dołączone do obiektu budowlanego, można traktować jako sieć cienkich cylindrycznych przewodów, których średnice są zwykle dużo mniejsze od ich długości. Dodatkowo, wymiary poprzeczne elementów takich instalacji są zwykle dużo mniejsze od najkrótszej długości fali w widmie impulsu elektromagnetycznego wyładowania piorunowego. Właściwości te wykorzystywane są w analizach numerycznych oddziaływań wyładowań piorunowych do opisu zjawisk elektromagnetycznych zachodzących w takich obiektach.

Istniejące obecnie implementacje numeryczne opisu struktur „cienkoprzewodowych” przy pomocy równań Maxwell’a, opierają się na odpowiednim sformułowaniu dwupotencjałowych równań różniczkowo-całkowych w dziedzinie częstotliwości lub bezpośrednio w dziedzinie czasu. Równania te rozwiązywane są numerycznie, najczęściej przy wykorzystaniu metody momentów (MoM – ang. Method of Moments). Powyższy sposób postępowania, w którym równania sformułowane zostały w dziedzinie częstotliwości, zastosowano w oprogramowaniu wykorzystywanym w niniejszej pracy [139, 140].

Oprogramowanie to zostało stworzone i jest rozwijane przez zespół pod kierunkiem F. P. Dawalibi’ego [142]. Składa się ono z szeregu modułów programowych o różnym przeznaczeniu. W pracy wykorzystywano głównie dwa z nich: HIFREQ – program do obliczeń rozplywu prądów, potencjałów przewodów oraz pól elektromagnetycznych [140]; FFTSES – program pozwalający na wykonywanie szybkich przekształceń Fourier’a dla analiz prowadzonych w dziedzinie czasu [138].

W programie HIFREQ obliczenia prowadzone są dwuetapowo. W pierwszym etapie wyznaczane są rozplywy prądów w zdefiniowanej sieci przewodów. Otrzymane rozplywy prądów wykorzystywane są w etapie drugim do wyznaczania potencjałów przewodów oraz wartości natężeń pola elektromagnetycznego w zadanych punktach przestrzeni.

4.1. Pole elektromagnetyczne liniowego źródła prądu

Do opisu pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez liniowy przewód z prądem przyjęto następujące założenia:

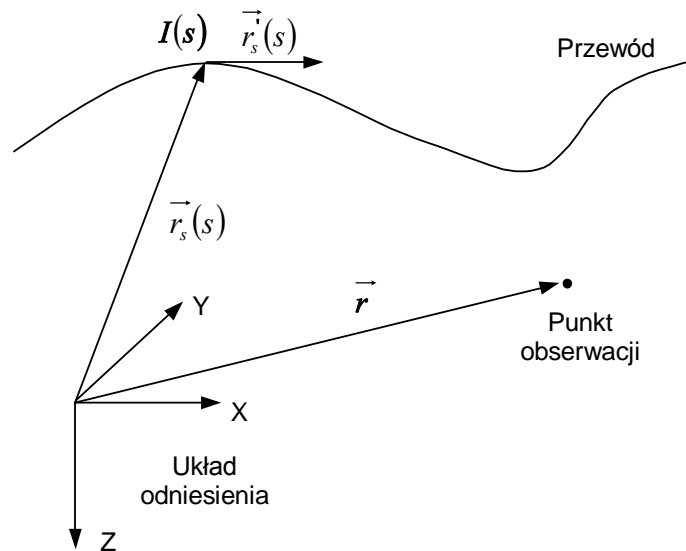
- przewód jest nieskończenie cienki;
- przewód jest usytuowany w całości w jednej warstwie wielowarstwowego ośrodka (powietrze oraz wiele poziomych warstw gruntu ułożonych jedna pod drugą);
- właściwości elektryczne każdej z warstw ośrodka są niezależne od wartości pola elektromagnetycznego.

Koncepcja liniowego źródła prądu jest idealizowaną reprezentacją matematyczną przewodu z prądem (rys. 4.1) [136]. Przy założeniu, że w dowolnie wybranym punkcie s nieskończenie cienkiego przewodu, którego kształt opisuje krzywa wyznaczona końcem wektora $\vec{r}_s(s)$, płynie prąd $I(s)$, gęstość prądu w dowolnym punkcie wyrażona może być zależnością:

$$\vec{J}(\vec{r}) = \int I(s) \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}_s(s)) \cdot \vec{r}'_s(s) \cdot ds \quad (4.1)$$

gdzie $\vec{r}'_s(s) = \frac{d}{ds} \vec{r}_s$ jest wektorem stycznym do krzywej \vec{r}_s .

Całka z gęstości prądu \vec{J} po przekroju poprzecznym przewodu w punkcie $\vec{r} = \vec{r}_s(s)$ wynosi $I(s)$. W tej interpretacji, liniowe źródło prądu jest zbiorem źródeł punktowych (funkcja „delta” δ) o wartościach prądu $I(s)$, które usytuowane są w punktach $\vec{r} = \vec{r}_s(s)$ i zorientowane w kierunku wektora $\vec{r}'_s(s)$. Ten zbiór źródeł punktowych funkcjonuje jako zbiór elementarnych dipoli. Określona wielkość elektromagnetyczna w dowolnym punkcie przestrzeni opisywana jest sumą składowych pochodzących od wszystkich dipoli.



Rys. 4.1. Idealizowana reprezentacja matematyczna przewodu z prądem [136]

Podstawą do sformułowania równań dwupotencjałowych są równania Maxwell'a oraz równanie (4.1) określające gęstość prądu płynącego w przewodzie.

W jednorodnym stratnym ośrodku, przy uwzględnieniu:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= \varepsilon \cdot \vec{E} \\ \vec{B} &= \mu \cdot \vec{H} \end{aligned} \quad (4.2)$$

równania Maxwell'a można zapisać w następującej postaci:

$$\begin{aligned} \varepsilon \cdot \nabla \cdot \vec{E} &= \rho \\ \nabla \cdot \vec{H} &= 0 \\ \nabla \times \vec{E} &= j\omega\mu \cdot \vec{H} \\ \nabla \times \vec{H} &= \theta \cdot \vec{E} + \vec{J}_{ext} \end{aligned} \quad (4.3)$$

gdzie:

- $\theta = \sigma + j\omega\varepsilon$ – zespolona przewodność ośrodka;
- ε – przenikalność elektryczna;
- μ – przenikalność magnetyczna;
- σ – przewodność ośrodka;
- \vec{J}_{ext} – gęstość prądu źródła określona równaniem (4.1).

Dla ośrodka wielowarstwowego powyższe równania odnoszą się do każdej z warstw. Warunki brzegowe opisywane są ciągłością składowych stycznych wektorów pól elektrycznego i magnetycznego na granicach warstw o różnych właściwościach elektrycznych.

Po przekształceniu równań Maxwell'a do postaci, w której jedyną zmienną jest wektorowy potencjał Hertz'a [112, 136] otrzymuje się:

$$\nabla^2 \vec{\Pi} = \gamma^2 \vec{\Pi} - \frac{1}{\theta} \vec{J}_{ext} \quad (4.4)$$

gdzie: $\gamma = \sqrt{j\omega\theta}$

Przy czym wektorowy potencjał Hertz'a $\vec{\Pi}$ definiowany jest następująco:

$$\vec{\Pi} = \frac{j\omega}{\gamma^2} \vec{A} = \frac{1}{\mu\theta} \vec{A}$$

oraz: $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$; $\vec{E} = -j\omega \vec{A} - \nabla \phi$; $\nabla \cdot \vec{A} = -\mu\theta\phi$;

ϕ - potencjał skalarny, \vec{A} - potencjał wektorowy.

Znajomość wektorowego potencjału Hertz'a pozwala na wyznaczenie pozostałych wielkości elektromagnetycznych przy użyciu następujących przekształceń matematycznych:

$$\begin{aligned} \phi &= -\nabla \cdot \vec{\Pi} \\ \vec{E} &= -\gamma^2 \vec{\Pi} + \nabla(\nabla \cdot \vec{\Pi}) \\ \vec{H} &= \theta \cdot \nabla \times \vec{\Pi} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Rozwiązanie równania (4.4) można przedstawić w postaci liniowej superpozycji składowych pochodzących od poszczególnych elementarnych dipoli elektrycznych:

$$\vec{\Pi} = \int \vec{\Pi}_s \cdot ds \quad (4.6)$$

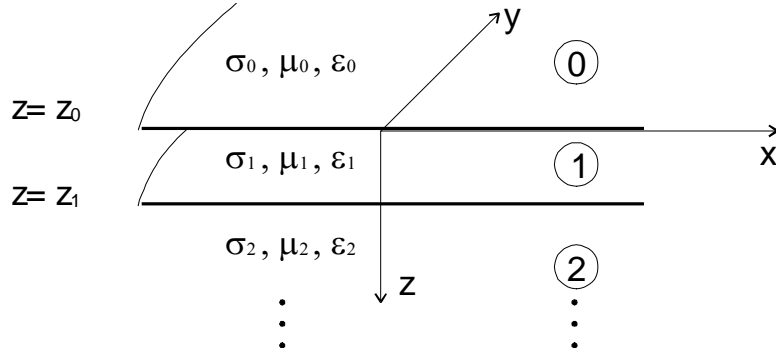
przy czym składowa wektorowego potencjału Hertz'a $\vec{\Pi}_s$ pochodząca od elementarnego dipola zorientowanego wzdłuż krzywej \vec{r}_s , spełnia równanie:

$$\nabla^2 \vec{\Pi}_s = \gamma^2 \vec{\Pi}_s - \frac{I(s)}{\theta} \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r}_s) \cdot \vec{r}_s \quad (4.7)$$

Dla pojedynczego dipola ułożonego w płaszczyźnie x-z wielowarstwowego ośrodka (rys. 4.2), składowa y-owa potencjału wektorowego jest równa zero. W takim przypadku warunki brzegowe na granicach poszczególnych warstw prowadzą do następujących relacji pomiędzy składowymi potencjału wektorowego [136]:

$$\begin{aligned} \gamma_k^2 \Pi_x^k &= \gamma_{k+1}^2 \Pi_x^{k+1} \\ \theta_k \Pi_z^k &= \theta_{k+1} \Pi_z^{k+1} \\ \theta_k \frac{\partial}{\partial z} \Pi_z^k &= \theta_{k+1} \frac{\partial}{\partial z} \Pi_z^{k+1} \\ \frac{\partial}{\partial x} \Pi_x^k + \frac{\partial}{\partial z} \Pi_z^k &= \frac{\partial}{\partial x} \Pi_x^{k+1} + \frac{\partial}{\partial z} \Pi_z^{k+1} \end{aligned} \quad (4.8)$$

gdzie indeks k oznacza numer warstwy. Równania te uzupełnia jeszcze warunek, że potencjał wektorowy musi mieć skończoną wartość dla $z \rightarrow \pm\infty$. W przypadku innej orientacji dipola, wykorzystuje się te same relacje po dokonaniu odpowiednich przekształceń geometrycznych.



Rys. 4.2. Geometria ośrodka wielowarstwowego [136]

Wyrażając funkcję delta δ w równaniu (4.7) przy pomocy funkcji Bessel'a:

$$\delta(\vec{r}) = \int_0^{\infty} \lambda \cdot J_0(\lambda r) \cdot \delta(z) \frac{d\lambda}{2\pi}$$

otrzymuje się składowe potencjału wektorowego w następującej postaci [136]:

$$\begin{aligned} \Pi_x^k &= \int_0^{\infty} \left[\eta_k(\lambda) \cdot e^{-\alpha_k |z|} + F_k(\lambda) \cdot e^{-\alpha_k z} + G_k(\lambda) \cdot e^{\alpha_k z} \right] \cdot J_0(\lambda r) \cdot d\lambda \\ \Pi_z^k &= \int_0^{\infty} \left[\tau_k(\lambda) \cdot e^{-\lambda_k |z|} + H_k(\lambda) \cdot e^{-\alpha_k z} + T_k(\lambda) \cdot e^{\alpha_k z} \right] \cdot J_0(\lambda r) \cdot d\lambda \\ &+ \cos \varphi \cdot \int_0^{\infty} \left[P_k(\lambda) \cdot e^{-\alpha_k z} + Q_k(\lambda) \cdot e^{\alpha_k z} \right] \cdot J_1(\lambda r) \cdot d\lambda \end{aligned} \quad (4.9)$$

Rozwiązanie to spełnia równania (4.7) oraz (4.8) dla $\alpha = \sqrt{\lambda^2 + \gamma^2}$. Wartości współczynników η , τ , F , G , H , T , P oraz Q zależą od ilości warstw oraz od tego, w których warstwach usytuowane są rozpatrywany dipol oraz punkt obserwacji.

W przypadku ośrodka jednorodnego tylko wartości współczynników η oraz τ są różne od zera, a całki w równaniach (4.9) mogą być wyznaczone analitycznie. Rozwiązanie przyjmuje wówczas następującą postać [136]:

$$\vec{\Pi} = \frac{1}{4\pi\theta} \cdot \int I(s) \cdot \frac{e^{-\gamma \cdot R}}{R} \cdot \vec{r}'_s(s) \cdot ds$$

gdzie: $R = \left| \vec{r} - \vec{r}'_s(s) \right|$, \vec{r} jest dowolnym punktem obserwacji w przestrzeni, a $\vec{r}'_s(s)$ wyznacza krzywą, wzdłuż której ułożony jest rozpatrywany przewód z prądem.

W ośrodku dwuwarstwowym, w którym granicą warstw (oznaczonych odpowiednio jako 0 i 1) jest płaszczyzna $z = 0$, rozwiązanie przyjmuje następującą postać [23, 136]:

$$\begin{aligned} \Pi_x &= \int x'_s(s) \left[M\delta_{mn} + U_{mn} \right] \frac{I(s)}{4\pi\theta_m} ds \\ \Pi_y &= \int y'_s(s) \left[M\delta_{mn} + U_{mn} \right] \frac{I(s)}{4\pi\theta_m} ds \\ \Pi_z &= \int \left\{ z'_s(s) \left[M\delta_{mn} + V_{mn} \right] + \left[x'_s(s)\partial_x + y'_s(s)\partial_y \right] W_{mn} \right\} \frac{I(s)}{4\pi\theta_m} ds \end{aligned}$$

gdzie m oraz n są numerami warstw, w których zlokalizowane są odpowiednio punkt obserwacji oraz źródło prądu. Współczynnik M wyraża się wzorem:

$$M = \frac{e^{-\gamma_m \cdot R}}{R} - \frac{e^{-\gamma_n \cdot R}}{R_r}$$

w którym R jest odległością pomiędzy źródłem prądu a punktem obserwacji, natomiast R_r jest odległością pomiędzy lustrzanym odbiciem źródła prądu a punktem obserwacji:

$$R_r = \sqrt{(x - x_s(s))^2 + (y - y_s(s))^2 + (z + z_s(s))^2}.$$

Macierze współczynników U , V oraz W są określone odpowiednimi zależnościami całkowymi wyrażonymi przez funkcje Bessel'a oraz jako funkcje parametrów opisujących strukturę i właściwości elektryczne poszczególnych warstw ośrodka [23].

4.2. Wyznaczenie rozplywu prądów

Obecność struktury przewodzącej w wielowarstwowym ośrodku uwzględniana jest poprzez sformułowanie warunków brzegowych na powierzchni przewodów tej struktury. Analogicznie, jak w przypadku granicy warstw ośrodka o różnych właściwościach elektrycznych, warunek brzegowy wymaga zachowania ciągłości składowych stycznych pól E i H na powierzchni przewodów. Warunek ten można wyrazić następująco [112, 136]:

$$E_T = Z \cdot I \quad (4.10)$$

gdzie:

- E_T – składowa styczna pola elektrycznego na powierzchni przewodu;
- Z – impedancja wewnętrzna przewodu.

Dla cylindrycznego przewodu o promieniach wewnętrznym b oraz zewnętrznym a impedancja wewnętrzna przewodu wyrażona jest wzorem [112, 136]:

$$Z = \frac{1}{2\pi a} \cdot \left(\frac{j\omega\mu}{\sigma} \right)^{1/2} \cdot \left[\frac{I_0(\gamma a)K_1(\gamma b) + K_0(\gamma a)I_1(\gamma b)}{I_1(\gamma a)K_1(\gamma b) - I_1(\gamma b)K_1(\gamma a)} \right]$$

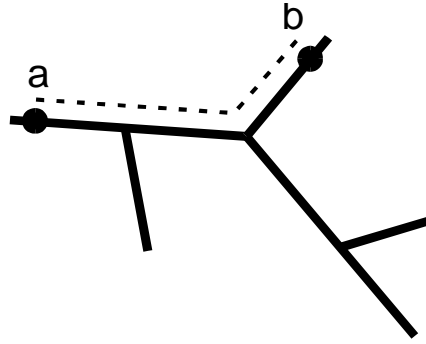
gdzie: μ , σ oraz γ są właściwościami elektrycznymi tego przewodu.

Równanie (4.10) jest słuszne w przypadku nieskończenie długiego cienkiego przewodu, jednak z dobrym przybliżeniem można je zastosować dla przewodu, którego promień jest co najmniej kilkakrotnie mniejszy w porównaniu z jego długością oraz przewód ten nie znajduje się zbyt blisko granicy ośrodków o różnych właściwościach elektrycznych [136]. Można przyjąć, że pole elektryczne na powierzchni przewodu ma tylko składową osiową. W takich warunkach równanie (4.10) może być zapisane w następującej postaci:

$$\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s} - \int_a^b ZI \cdot ds = 0 \quad (4.11)$$

gdzie:

- a, b – punkty na powierzchni przewodu wyznaczające początek i koniec drogi całkowania położonej w całości na powierzchni przewodów (rys. 4.3);
- ds – długość elementarnego odcinka wzdłuż drogi całkowania;
- $d\vec{s} = ds \cdot \vec{t}$;
- \vec{t} – jednostkowy wektor styczny do drogi całkowania w danym punkcie.



Rys. 4.3. Droga całkowania wzdłuż przewodów (równanie (4.11)) [136]

Uwzględniając: $\vec{E} = -\nabla\phi - \gamma^2 \vec{\Pi}$ oraz $\nabla\phi \cdot d\vec{s} = d\phi$, warunek brzegowy na powierzchni przewodów przyjmuje postać [136]:

$$\phi(b) - \phi(a) + \int_a^b \gamma^2 \vec{\Pi} \cdot d\vec{s} + \int_a^b ZI \cdot ds = 0 \quad (4.12)$$

Jest on słuszny dla każdej pary punktów a i b oraz dowolnej drogi całkowania umiejscowionej w całości na powierzchni przewodów zdefiniowanej struktury.

Przedstawione rozważania dotyczą przewodów, umieszczonych w całości w jednorodnym ośrodku. Struktura przewodząca o dowolnej postaci, umieszczona w ośrodku niejednorodnym musi zostać zdefiniowana w taki sposób, aby warunki brzegowe wyrażone równaniem (4.12) były słuszne dla każdej z warstw ośrodku. Oznacza to, że pojedynczy przewód przekraczający granicę dwu warstw powinien zostać podzielony na segmenty, z których każdy znajduje się w całości w jednej warstwie. Podobnie, krzyżujące się przewody powinny zostać podzielone na segmenty w miejscach ich krzyżowania się. Miejsca te wyznaczają tzw. węzły w modelowanej strukturze.

W celu wyznaczenia rozptyłu prądów w tak zdefiniowanej sieci przewodów, nieznanne prądy we wszystkich jej segmentach opisywane są zbiorem parametrów. Dla pojedynczego segmentu i zakłada się, że rozkład prądu $I_i(s)$ w tym segmencie jest liniowy [103, 136]:

$$I_i(s) = b_i + m_i(s - 1/2)$$

gdzie:

- b, m – nieznanne parametry;
- $s = s' / L$ dla $0 \leq s \leq 1$
- s' – odległość od początku segmentu;
- L – długość tego segmentu.

Założenie liniowego rozkładu prądu w segmencie nakłada dodatkowy warunek na maksymalną długość takiego segmentu. Liniowa aproksymacja rozkładu prądu wzdłuż segmentu dla pojedynczej harmonicznej jest bowiem słuszna w przypadku, gdy długość segmentu jest dużo mniejsza od długości fali (co najmniej kilkukrotnie). W praktyce, oznacza to konieczność dalszego podziału sieci na segmenty o długościach nie większych niż $\lambda_{\min} / 6$ [140], gdzie λ_{\min} jest najkrótszą długością fali odpowiadającą najwyższej analizowanej częstotliwości (w widmie impulsu elektromagnetycznego wyładowania piorunowego).

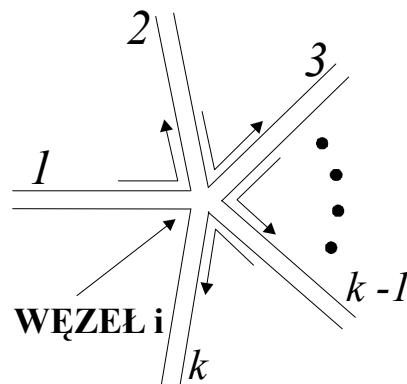
Przy powyższych założeniach prąd w każdym z segmentów opisany jest jednoznacznie przez dwa nieznanne parametry b oraz m . Do wyznaczenia rozptyłu prądów w badanej konfiguracji potrzebne są więc po dwa równania na segment. Przekładając to na węzły sieci: dla każdego węzła, do którego dołączonych jest n segmentów wymagane jest n równań.

Zbiór równań niezbędnych do obliczenia rozptywu prądów w badanej strukturze otrzymywany jest w wyniku sformułowania:

- warunków brzegowych na powierzchni przewodów (równanie (4.12)) oraz na granicy warstw ośrodka (równanie (4.9));
- praw Kirchoff'a w węzłach sieci;
- prądów wpływających do układu z zewnątrz (ze źródeł).

W równaniach tych szukane prądy zastępuje się opisaną wyżej reprezentacją parametryczną.

Zasadę formułowania równań zilustrowano na rys. 4.4. Jeśli do węzła dołączony jest tylko jeden segment, zakłada się, że prąd dopływający do tego węzła jest równy zero. Jeśli liczba segmentów dołączonych do węzła jest większa niż 1, i wynosi np. k , to warunek brzegowy zdefiniowany równaniem (4.12) jest formułowany w odniesieniu do centralnych punktów poszczególnych par segmentów: 1 i 2, 2 i 3, ..., $k-1$ i k . Powstaje w ten sposób $k-1$ równań. Dodatkowe, k -te równanie tworzone jest na podstawie prawa Kirchoff'a dla węzła.



Rys. 4.4. Zasada formułowania równań przy obliczeniach rozptywu prądów [136]

Otrzymany rozptyw prądów pozwala na obliczenie wszystkich pozostałych wielkości: potencjałów poszczególnych segmentów (centralnych punktów segmentów) względem ziemi odniesienia, oraz pól elektromagnetycznych w dowolnie zdefiniowanych punktach obserwacji w przestrzeni.

4.3. Właściwości algorytmu przekształcenia Fourier'a

Dla przypadków rozbudowanych konfiguracji przewodzących umieszczonych w ośrodkach co najmniej dwuwarstwowych, a takie układy są analizowane w niniejszej pracy, prowadzenie obliczeń jest niezwykle czasochłonne. Przyczynia się do tego z jednej strony duża liczba segmentów niezbędna do odpowiedniej reprezentacji rozbudowanej konstrukcji przy stosunkowo wysokich częstotliwościach (założenie liniowej zmiany prądu wzdłuż segmentów), z drugiej, algorytm podwójnego całkowania stosowany do wyznaczania całek Sommerfeld'a dla struktur umieszczonych w gruntach wielowarstwowych.

Główna składowa całkowitego czasu obliczeń jest wynikiem operacji wyznaczania rozptywu prądów. Jest ona proporcjonalna do kwadratu liczby segmentów. Mniejszy wkład wnoszą operacje odwracania macierzy. Ponieważ jednak czas trwania tych operacji jest proporcjonalny do sześcianu liczby segmentów, to jest on również znaczący przy dużej liczbie segmentów. Wreszcie najmniej istotny wkład w całkowity czas obliczeń wnoszą obliczenia wartości pola elektromagnetycznego (czas trwania obliczeń jest tu wprost proporcjonalny do liczby segmentów).

Przykładowo, uproszczony model stacji bazowej (rys. 7.11) wraz z dołączonym do wieży 400 m przewodem modelującym kanał wyładowania, składa się z ok. 2250 segmentów. Przeciętny czas obliczeń dla pojedynczej harmonicznej na komputerze Intel Pentium 4 z zegarem 3 GHz oraz z 0,98 GB pamięci operacyjnej wynosi około czterech godzin. Dla kilkuset lub nawet kilku tysięcy częstotliwości potrzebnych do odwzorowania widma impulsu prądu wyładowania piorunowego, szczególnie w przypadku wyładowań następných, całkowity czas obliczeń może sięgać kilku miesięcy.

W celu skrócenia czasu obliczeń, program FFTSES wyposażony został w algorytm wyboru minimalnego zestawu częstotliwości, tzw. częstotliwości krytycznych z widma sygnału wymuszającego, które są niezbędne do prawidłowego odtworzenia przebiegu czasowego tego sygnału. Dzięki temu do wykonania operacji odwrotnego przekształcenia Fourier'a niezbędne jest wykorzystanie wyników obliczeń z programu HIFREQ tylko dla zestawu częstotliwości krytycznych. Wartości próbek wynikowego sygnału analizowanej wielkości elektromagnetycznej dla pozostałych harmonicznych są w programie FFTSES interpolowane. Równocześnie program przeprowadza analizę sygnału pod kątem ewentualnych zjawisk rezonansowych, które mogą zachodzić w modelowanej strukturze i być przyczyną błędów interpolacji. W wyniku tej analizy proponowany jest zwykle dodatkowy zestaw harmonicznych, dla których wykryto rezonanse, z sugestią przeprowadzenia dla nich dokładnych obliczeń w programie HIFREQ. Proces doboru dodatkowych częstotliwości zazwyczaj musi być powtórzony kilkakrotnie zanim wszystkie istotne z punktu widzenia powstających rezonansów harmoniczne zostaną uwzględnione w odwrotnym przekształceniu Fourier'a.

Zastosowany algorytm wyboru dodatkowych częstotliwości nie jest jednak optymalny. W praktyce, w celu odniesienia spodziewanych korzyści w postaci skrócenia czasu obliczeń, niezbędne było śledzenie wyników oraz dobór na bieżąco po każdym etapie tylko tych harmonicznych, które były rzeczywiście istotne dla właściwego odtworzenia przebiegu czasowego analizowanego sygnału.

Wybór zestawu częstotliwości zależał od kształtu prądu wymuszającego, konkretnego modelu obiektu, wyznaczonej wielkości oraz miejsca, w którym ta wielkość była wyznaczana. Przykładowo, do wyznaczenia prądów oraz spadków napięć w stacji bazowej dla pierwszego wyładowania głównego za optymalny uznano zestaw ok. 40 częstotliwości. Do wyznaczenia prądów oraz spadków napięć w kontenerze i w dolnych partiach wieży w tej samej stacji bazowej dla następnego wyładowania głównego, niezbędne było wykonanie obliczeń dla ok. 200 harmonicznych. Natomiast do wyznaczenia przebiegów prądów wzdłuż 400 m kanału wyładowania, który dołączono do wieży przy analizie zjawisk falowych w przypadku wyładowania następnego, niezbędne okazało się wykonanie obliczeń dla ok. 580 częstotliwości.

5. Badania terenowe

Pomiary terenowe prowadzono w typowych stacjach bazowych telefonii komórkowej GSM. Każda ze stacji zawierała wieżę o wysokości 50 - 60 m o podstawie trójkątnej (bok długości ok. 4 - 6 m) oraz kontener technologiczny ustawiony na fundamencie obok wieży (rys. 5.1). Wymiary typowego kontenera: długość - 3,8 m; szerokość - 2,5 m; wysokość - 3 m.



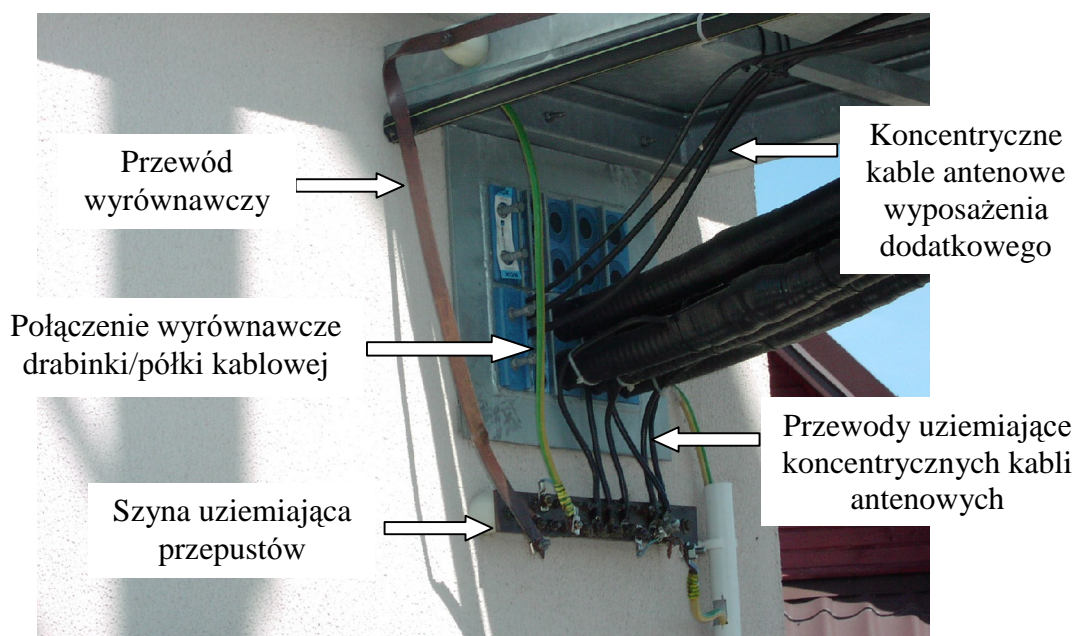
Rys. 5.1. Stacja bazowa GSM – widok ogólny

Badane obiekty różniły się w szczegółowych rozwiązaniach konfiguracji wież i kontenerów, systemów uziomowych i wyrównywania potencjałów, w sposobie prowadzenia kabli antenowych wzdłuż wieży oraz w rozwiązaniach połączeń zbrojenia kontenera z uziomem.

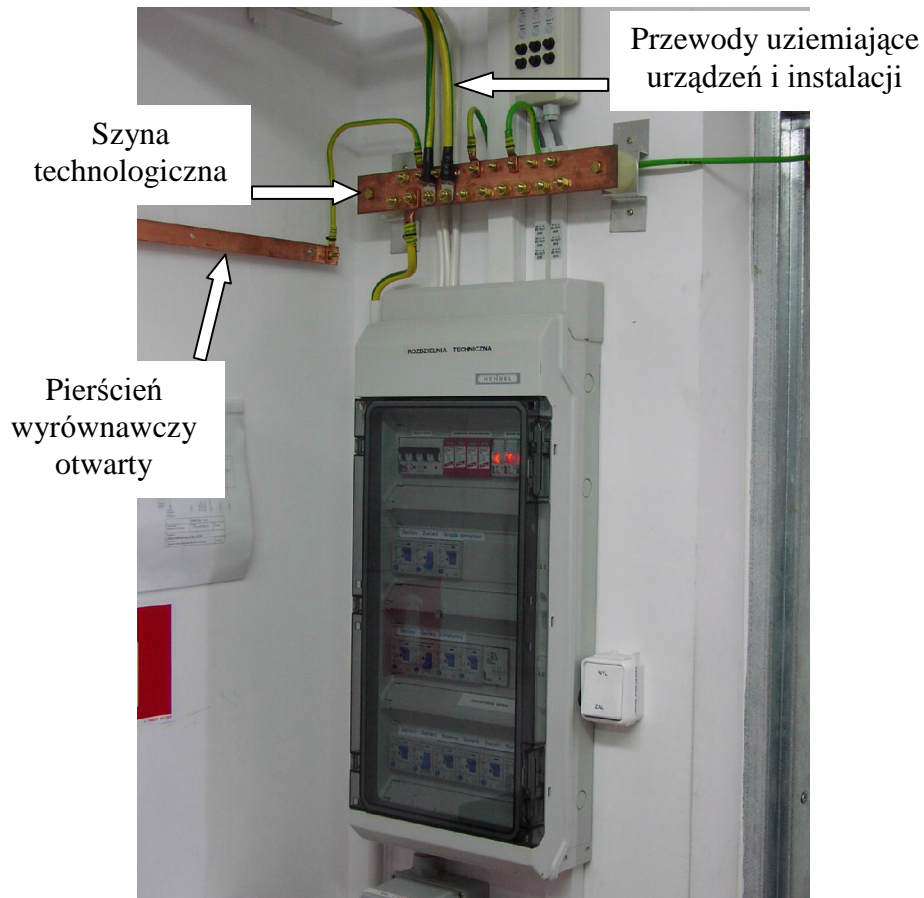
Wśród zasadniczych elementów wspólnych stacji należy wymienić następujące:

- zwody pionowe umieszczone na szczycie wieży;
- anteny, sześć koncentrycznych kabli antenowych ułożonych wzdłuż wieży oraz koncentryczne kable antenowe wyposażenia dodatkowego;
- przewód odprowadzająco-wyrównawczy (izolowany lub taśma), ułożony wzdłuż drabinki kablowej, niekiedy łączony co kilka metrów z drabinką / konstrukcją wieży;

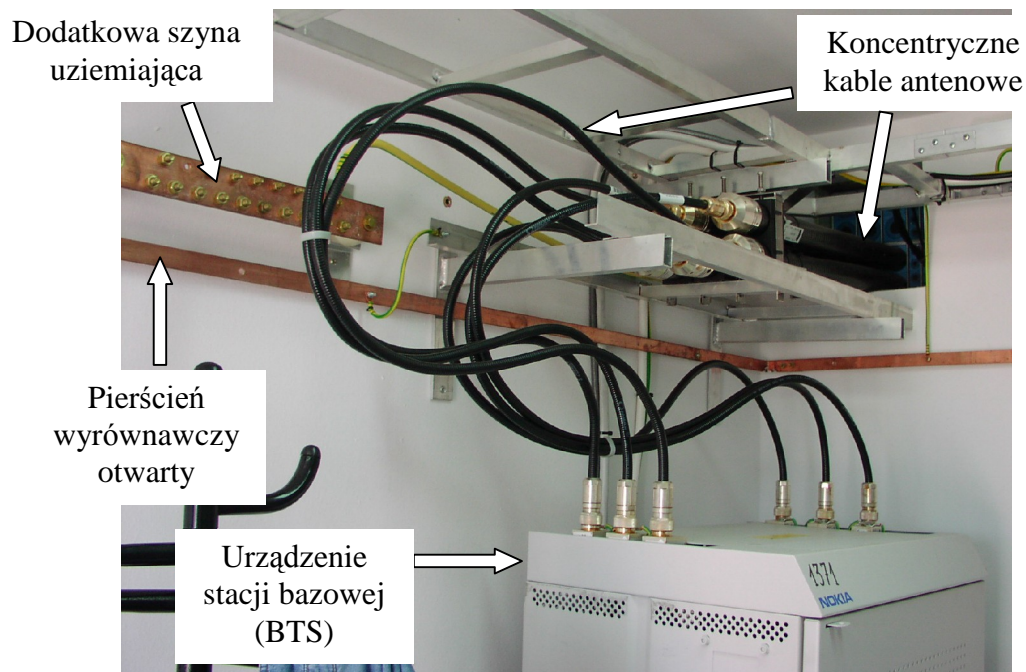
- szyny wyrównawcze na szczycie wieży do przyłączenia przewodu odprowadzająco-wyrównawczego, przewodów uziemiających konstrukcji anten (płaszczki kabli antenowych) i instalacji metalowych;
- szyna uziemiająca u podstawy wieży, ok. 2 - 3 m nad ziemią, do przyłączenia przewodu odprowadzająco-wyrównawczego, przewodów wyrównawczych oraz instalacji metalowych;
- szyna uziemiająca przepustów, umieszczona na zewnętrznej ścianie kontenera, zazwyczaj pod przepustami kablowymi, przeznaczona do przyłączenia przewodów uziemiających kabli antenowych (rys. 5.2);
- główna szyna uziemiająca (nazywana także szyną technologiczną), umieszczona w kontenerze nad rozdzielnicą nn, przeznaczona do przyłączenia przewodów uziemiających urządzeń, przewodów instalacji wyrównywania potencjałów oraz przewodu ochronnego lub ochronno-neutralnego przyłącza zasilania obiektu (rys. 5.3);
- dodatkowa szyna uziemiająca w kontenerze przy urządzeniach stacji bazowej (BTS) do ewentualnego przyłączenia urządzeń ograniczających przepięcia w kablach antenowych, przyłączona do zacisku probierczego pod szyną przepustów (rys. 5.4) – w badanych obiektach nie wykorzystywana;
- pierścień wyrównawczy otwarty w postaci taśmy ułożonej wzdłuż trzech ścian wewnątrz kontenera na wysokości ok. 1,5 – 1,6 m nad podłogą (rys. 5.3 i 5.4);
- wyposażenie: urządzenie stacji bazowej (rys. 5.4), siłownia prądu stałego, rozdzielnica nn (rys. 5.3), wyposażenie dodatkowe (radiolinia, modem, centrala alarmów itp.);
- przyłącze niskiego napięcia w systemie TN-S lub TN-C-S z przewodem ochronnym lub ochronno-neutralnym dołączonym do uziemiającej szyny technologicznej, zrealizowane kablem podziemnym ze stacji transformatorowej znajdującej się w odległości kilkudziesięciu – kilkuset metrów od obiektu;
- system uziomowy składający się co najmniej z połączonych uziomów otokowych wokół wieży i kontenera oraz uziomu otokowego wokół całej stacji, który jest połączony co kilka metrów ze słupkami ogrodzenia (rys. 5.5).



Rys. 5.2. Stacja bazowa – przepusty kablowe na kontenerze



Rys. 5.3. Stacja bazowa – główna szyna uziemiająca (technologiczna) nad rozdzielnicą nn



Rys. 5.4. Stacja bazowa – urządzenie radiowe stacji bazowej z wyprowadzeniami kabli antenowych oraz dodatkowa szyna uziemiająca do przyłączenia urządzeń ograniczających przepięcia



Rys. 5.5. Zacisk probierczy pod szyną technologiczną (po lewej); połączenie ogrodzenia do uziomu otokowego wokół stacji oraz przewód powrotny do podłączenia generatora (po prawej)

Normy ochrony odgromowej [124, 127], określające zasady prowadzenia badań terenowych w obiektach budowlanych, zalecają stosowanie generatorów probierczych umieszczanych na dachach, punktach szczytowych [127] lub obok obiektów badanych [124]. W celu doprowadzenia do takiego rozptyłu prądów, który możliwie najdokładniej odwzorowuje zjawiska zachodzące podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego, zalecane jest [127] umieszczanie przewodów doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy w odpowiednio dużych odległościach od obiektu. Przykładowo, w obiektach wysokich odległość ta powinna być co najmniej trzykrotnie większa od średnicy obiektu [127].

Spełnienie tego warunku, nawet w przypadku małych stacji bazowych jest technicznie trudne w realizacji. Dodatkowo, istotny wpływ na rozptył prądu w badanej stacji mogą mieć wszelkie dołączone do niej przewodzące instalacje zewnętrzne oraz właściwości uziomów innych obiektów, połączonych z badaną stacją poprzez te instalacje.

Uwzględniając powyższe fakty, w prowadzonych badaniach terenowych ograniczono się do stosunkowo łatwo realizowalnych technicznie sposobów doprowadzenia prądu udarowego do wierzchołka wieży. Wyniki takich badań stanowią podstawę do prowadzenia zasadniczych analiz numerycznych oddziaływań wyładowań piorunowych na urządzenia, jako źródło informacji o właściwościach udarowych badanej stacji oraz instalacji uziomowych połączonych z nią innych obiektów.

Informacje o rozptywach prądów udarowych w obiekcie badanym w dostatecznym stopniu charakteryzują jego właściwości udarowe. Spadki napięć oraz prądy i napięcia indukowane wywołane przez rozptylające się prądy mogą być wyznaczone numerycznie. Dlatego w badaniach terenowych ograniczono się wyłącznie do pomiarów prądów udarowych.

5.1. Metodyka badań i charakterystyka wykorzystywanej aparatury

W badaniach terenowych prąd udarowy doprowadzano izolowanym przewodem do wierzchołka wieży z generatora probierczego umieszczonego obok wieży. Następnie prąd ten rozptylał się w przewodzących elementach konstrukcji wieży i kontenera, w innych instalacjach metalowych oraz w systemach wyrównywania potencjałów i uziomowym. Do zamknięcia obwodu prądowego wykorzystywano cztery izolowane przewody powrotne, które łączono do ogrodzenia stacji lub do czterech pomocniczych elektrod wbijanych w ziemię w pewnej odległości za ogrodzeniem. Badania prowadzono w trakcie normalnej pracy stacji.

Podstawowym elementem układu pomiarowego był generator napięciowo-prądowy UCS 500-M (rys. 5.6), który pozwala na wytworzenie:

- napięcia udarowego o kształcie $1,2/50 \mu\text{s}$ oraz regulowanej wartości szczytowej w zakresie od 250 V do 6,6 kV na otwartych zaciskach (obciążenie większe lub równe $10 \text{ k}\Omega$);
- prądu udarowego o kształcie $8/20 \mu\text{s}$ oraz regulowanej wartości szczytowej w zakresie od 125 A do 3,3 kA na zaciskach zwartych (obciążenie mniejsze lub równe $0,1 \Omega$).



Rys. 5.6. Generator UCS 500-M oraz oscyloskop HP 54522A wykorzystywane do badań terenowych w stacjach bazowych (po lewej); Pomiar prądu udarowego w przewodzie uziemiającym pierścienia wyrównawczego w kontenerze (po prawej)

Zastosowany generator umożliwiał wprowadzenie do przewodzących elementów konstrukcji stacji bazowych prądów udarowych o wartościach szczytowych od ok. 20 A do 300 A. Czasy czoła zawierały się w przedziale od ok. $1 \mu\text{s}$ do $20 \mu\text{s}$, a czasy do połowy wartości szczytowej ok. $40 - 50 \mu\text{s}$.

Do pomiarów prądów udarowych wykorzystywano sondy prądowe P6021 i P6022 o płaskiej charakterystyce przenoszenia w zakresie od 3 kHz do 10 MHz (pasmo 3 dB), oraz oscyloskopy cyfrowe HP 54600A, HP 54522A i TDS 3022B. Oscyloskopy miały możliwość zapisu rejestrowanych przebiegów w formacie cyfrowym bezpośrednio na dyskietce lub transmisji równoległej danych pomiarowych do komputera. Rysunek 5.6 przedstawia sposób pomiaru prądu udarowego w jednym z przewodów uziemiających wewnątrz kontenera.

W trakcie pojedynczej, trwającej ok. dwóch godzin serii pomiarowej, generator pracował bez przerwy wytwarzając prądy udarowe co ok. 1 - 10 minut, a pomiary dokonywane były nie jednocześnie we wszystkich punktach pomiarowych, ale kolejno.

W prowadzonych badaniach zarówno generator jak i aparatura pomiarowa zasilane były z oddzielnego zasilacza UPS. Tylko w przypadku jednej z badanych stacji zasilanie urządzeń układu pomiarowego zrealizowano z sieci potrzeb własnych stacji.

5.2. Przedstawienie wyników badań

Badania prowadzono w następujących obiektach w pobliżu Białegostoku:

- stacja bazowa w Krasnem Folwarcznem (nazywana dalej stacją Karczmisko);
- stacja bazowa w Goniądzu (nazywana stacją Goniądz);
- stacja bazowa w Knyszynie (stacja Knyszyn-tartak).

W niniejszej pracy przedstawiono szczegółowo wyniki pomiarów ze stacji Karczmisko i Goniądz. Pominięto, nie wnoszące zasadniczo nic nowego, wyniki dla stacji Knyszyn-tartak.

5.2.1. Stacja bazowa Karczmisko

Stacja bazowa Karczmisko zawiera stalową wieżę o wysokości 60 m. Konstrukcję wieży stanowią trzy słupy wsporcze rozstawione na podstawie trójkątnej. Drabinka kablowa, kable antenowe oraz przewód odprowadzająco-wyrównawczy poprowadzone są wzdłuż jednego z boków wieży. Przewód odprowadzająco-wyrównawczy połączony jest do czterech szyn wyrównawczych znajdujących się u szczytu wieży oraz do szyny uziemiającej u podstawy wieży, ok. 2 m nad ziemią. Dodatkowo przewód ten jest łączony do konstrukcji wieży co kilka metrów wzdłuż całej swej długości. Od szyny uziemiającej wieży poprowadzona jest taśma wyrównawcza łącząca tę szynę z szyną uziemiającą przepustów na kontenerze. Taśma ta jest ułożona wzdłuż zewnętrznej półki kablowej. Plan stacji wraz z konfiguracją systemów uziomowego i wyrównywania potencjałów przedstawiono schematycznie na rys. 5.7.

System uziomowy stacji składa się z połączonych otoków ułożonych wokół:

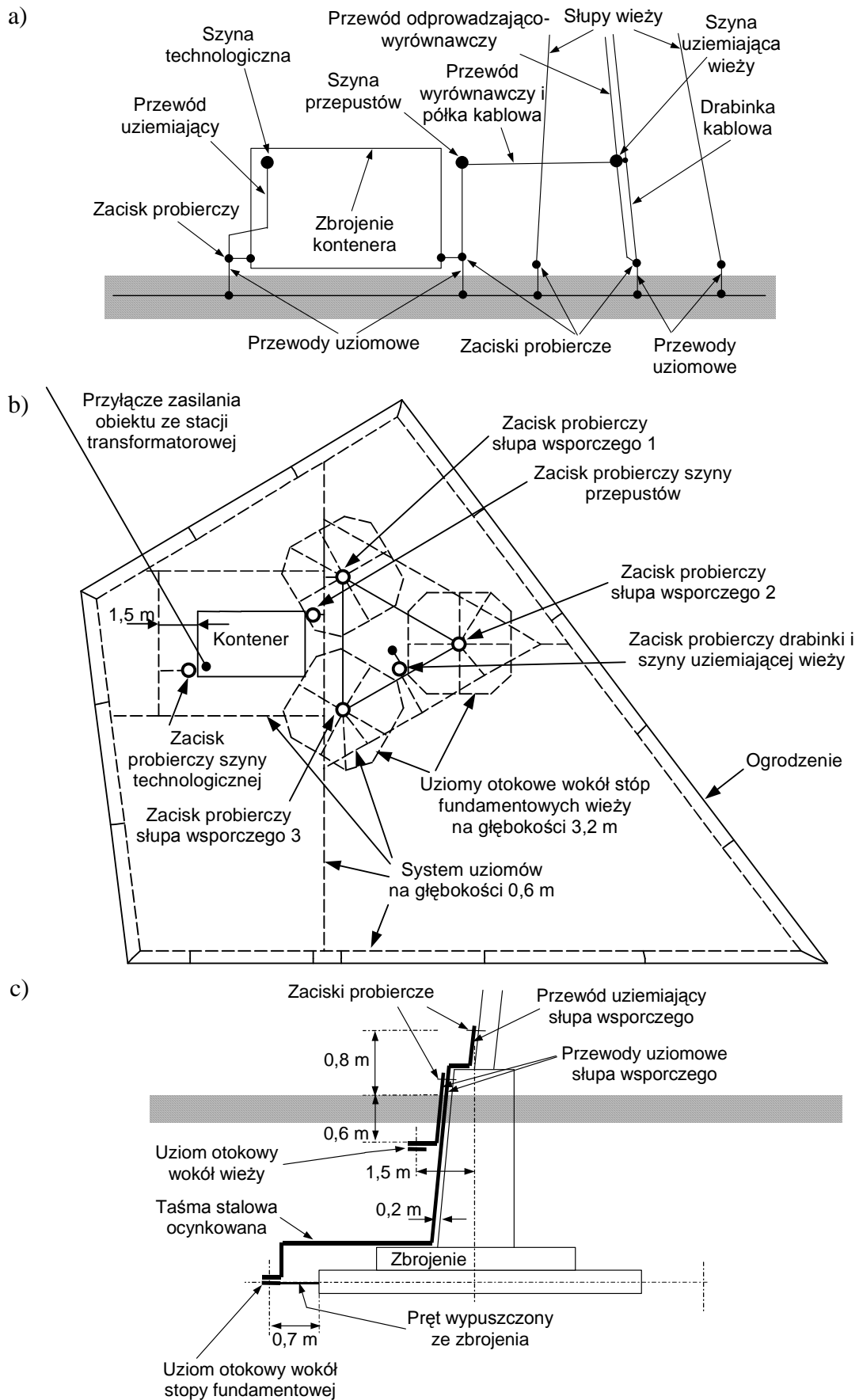
- wieży, kontenera oraz całego terenu stacji – zakopane na głębokości 60 cm;
 - stóp fundamentowych trzech słupów wsporczych wieży – zakopane na głębokości 3,2 m.
- Do uziomów otokowych wokół stóp fundamentowych przyłączone są pręty zbrojenia fundamentów odpowiednich słupów wsporczych wieży oraz przewody uziomowe tych słupów (taśma stalowa ocynkowana), poprowadzone od znajdujących się u podstawy wieży zacisków probierczych (rys. 5.7 c)).

Zbrojenie kontenera połączone jest z systemem uziomów poprzez odpowiednie zaciski probiercze szyn uziemiających kontenera (szyny technologicznej oraz szyny przepustów), jak pokazano na rys. 5.7 a). Na rysunku 5.7 b) zaznaczono również schematycznie przyłącze zasilania obiektu ze stacji transformatorowej.

Podczas badań generator probierczy ustawiono na ziemi obok wieży. Zacisk wysokiego napięcia generatora dołączono do zwodu instalacji piorunochronnej na szczycie wieży. Do połączenia zastosowano izolowany przewód, który ułożono wzdłuż drabinki kablowej na jednym z boków wieży (pomiędzy słupami wsporczymi 2 i 3). Od wysokości rzędu kilkunastu metrów i niżej przewód ten schodził łagodnym łukiem w kierunku słupa 3 (na wysokości ok. 2 m znajdował się w odległości ok. 0,5 m od tego słupa). Prąd udarowy rozpływał się w konstrukcji wieży i kontenera, systemach wyrównywania potencjałów i uziomowym obiekcie, i wracał do generatora czterema izolowanymi przewodami powrotnymi. Przewody te łączono do ogrodzenia stacji lub do pomocniczych elektrod wbijanych w ziemię za ogrodzeniem.

Przeprowadzono pomiary prądów udarowych płynących w przewodach uziomowych i/lub uziemiających słupów wsporczych wieży, szyn uziemiających wieży i kontenera oraz drabinki kablowej (okrągłe punkty na rys. 5.7 b)), a także w wybranych przewodach wyrównawczych i uziemiających na zewnątrz i wewnątrz kontenera. Wykonano dwie serie pomiarów, które można scharakteryzować następująco:

- seria pomiarowa 1 – prąd udarowy o wartości szczytowej 294 A i kształcie 20/46 μ s, przewody powrotne łączone do ogrodzenia stacji;
- seria pomiarowa 2 – prąd udarowy o wartości szczytowej 72 A i kształcie 5/42 μ s, przewody powrotne łączone do elektrod wbitych w ziemię.

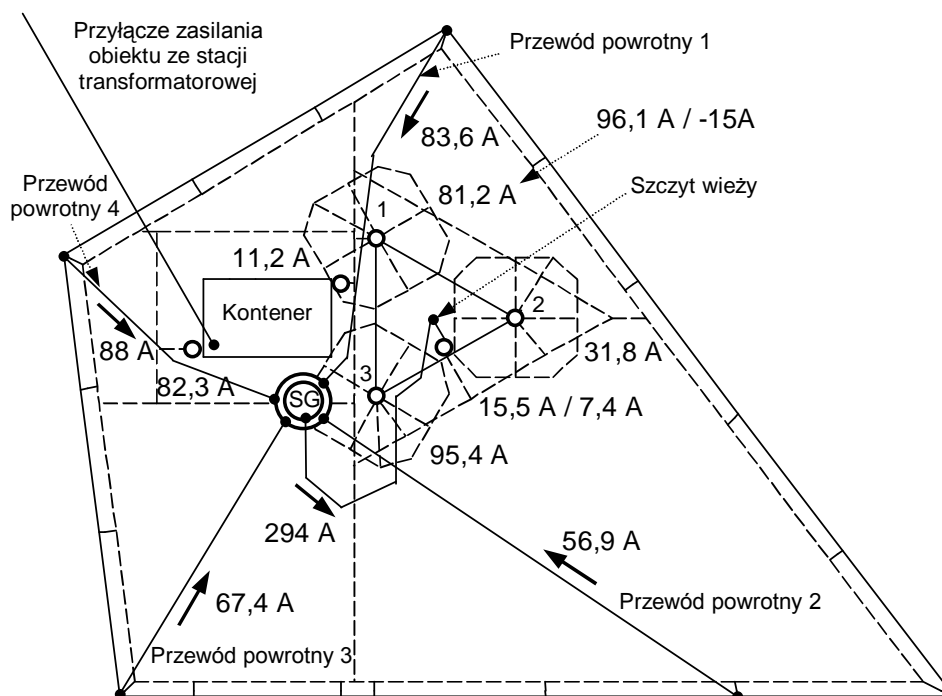


Rys. 5.7. Plan stacji Karczmisko: a) system wyrównywania potencjałów na zewnątrz kontenera; b) system uziomowy; c) szczegóły uziemienia stopy fundamentowej

Należy tu wspomnieć, że część prądu spływającego z wieży odprowadzana była do uziomu (ziemi) poprzez elementy zbrojenia poszczególnych stóp fundamentowych wieży. Względy techniczne uniemożliwiały jednak bezpośrednie pomiary tych prądów.

Seria pomiarowa 1

Rozpływy prądów udarowych w przewodach uziomowych i/lub uziemiających słupów wsporczych wieży i szyn uziemiających kontenera oraz w przewodach powrotnych odprowadzających prąd udarowy do generatora przedstawiono na rys. 5.8.



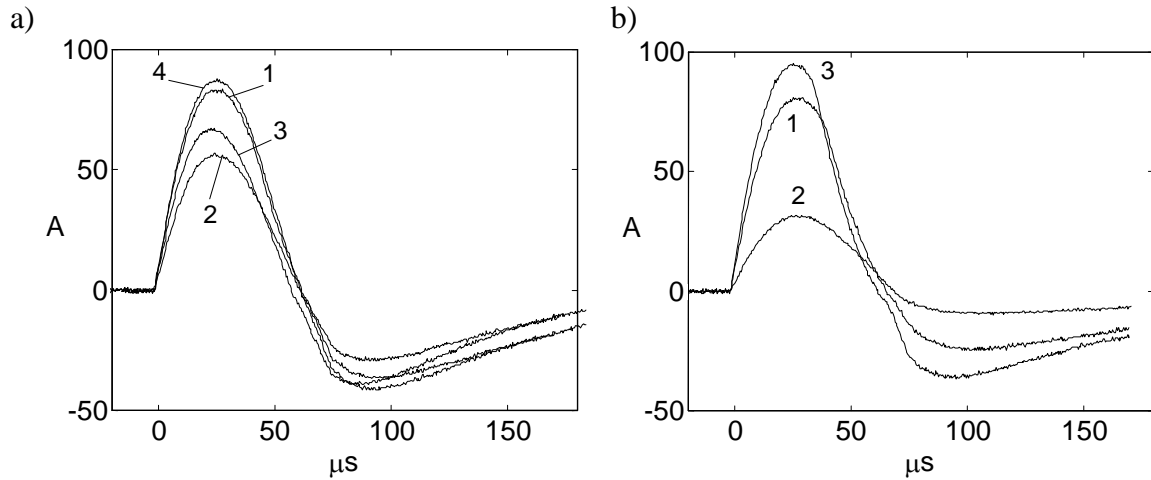
Rys. 5.8. Rozpływ prądów w przewodach uziomowych i uziemiających oraz w przewodach doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy do/z obiektu

Dwie wartości podane w miejscu zacisku probierczego drabinki kablowej (15,5 / 7,4 A) dotyczą prądów zmierzonych odpowiednio w przewodzie uziemiającym samej drabinki oraz w przewodzie uziemiającym szyny uziemiającej wieży.

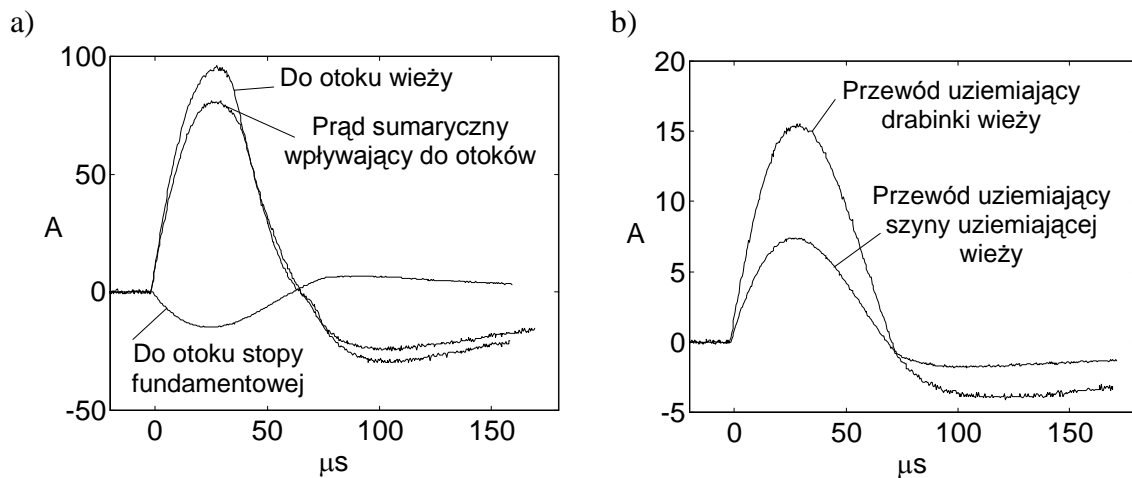
W przypadku słupa wsporczego 1 zmierzono zarówno sumaryczny prąd w przewodzie uziemiającym tego słupa odpływający do obu uziomów otokowych (wieży oraz stopy fundamentowej) (81,2 A) oraz dodatkowo, oddzielnie prądy w przewodach uziomowych odpływające do uziomów otokowych wieży (96,1 A) oraz stopy fundamentowej (-15 A). Ten ostatni ma wartość ujemną, co oznacza, że prąd wypływał z uziomu otokowego wokół stopy fundamentowej i wpływał do uziomu otokowego wokół wieży (rys. 5.7 c)). Dla słupów wsporczych 2 i 3 zmierzono tylko prądy płynące w przewodach uziemiających tych słupów (prądy odpływające do obu otoków).

Należy zwrócić uwagę na niesymetrię podziału prądów pomiędzy przewody powrotne odprowadzające prąd do generatora oraz pomiędzy przewody uziemiające trzech słupów wsporczych wieży. Niesymetria ta związana jest nie tylko z określoną konfiguracją instalacji stacji ale także z ułożeniem przewodów doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy do/z obiektu.

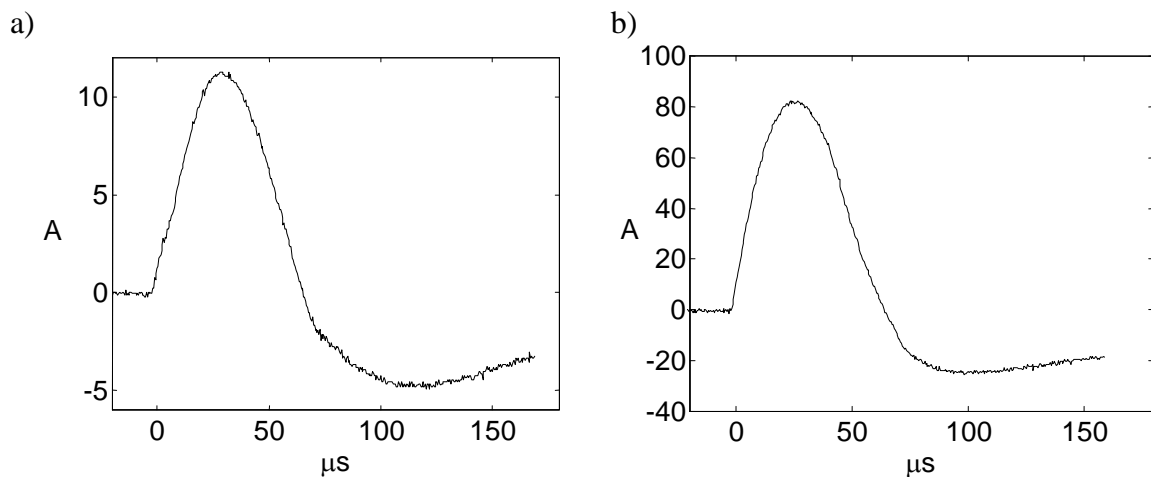
Zarejestrowane przebiegi czasowe omawianych prądów przedstawiono na rys. 5.9 - 5.11.



Rys. 5.9. Przebiegi prądów płynących: a) w przewodach powrotnych łączących generator z ogrodzeniem; b) w przewodach uziemiających trzech słupów wsporczych wieży

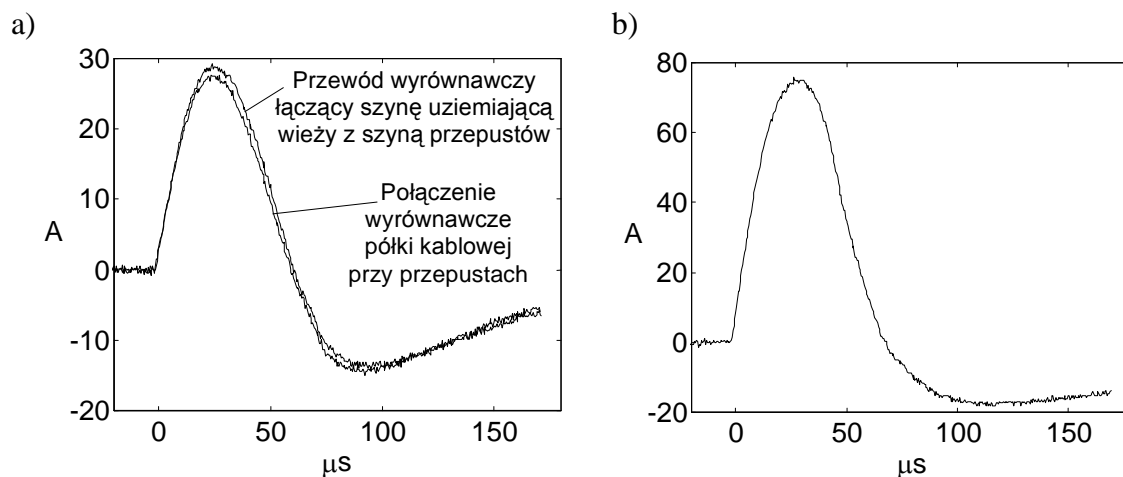


Rys. 5.10. Przebiegi prądów płynących: a) w przewodach uziomowych i uziemiającym słupie wsporczym 1; b) w przewodach uziemiających drabinki oraz szyny uziemiającej wieży

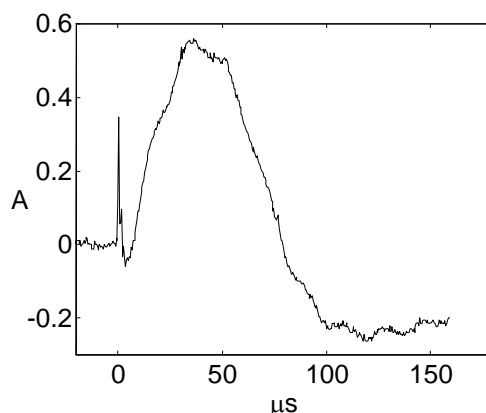


Rys. 5.11. Przebiegi prądów płynących w przewodach uziomowych: a) pod szyną przepustów; b) pod szyną technologiczną

Rysunki 5.12 i 5.13 przedstawiają przebiegi czasowe prądów płynących w wybranych elementach systemu wyrównywania potencjałów na zewnątrz kontenera: w przewodach wyrównawczych, w przewodzie uziemiającym szyny przepustów oraz w przewodzie uziemiającym jednego z kabli antenowych przy przepustach.



Rys. 5.12. Przebiegi prądów płynących: a) w przewodach wyrównawczych łączących szynę uziemiającą wieży oraz zewnętrzną półkę kablową z szyną przepustów; b) w przewodzie uziemiającym szyny przepustów

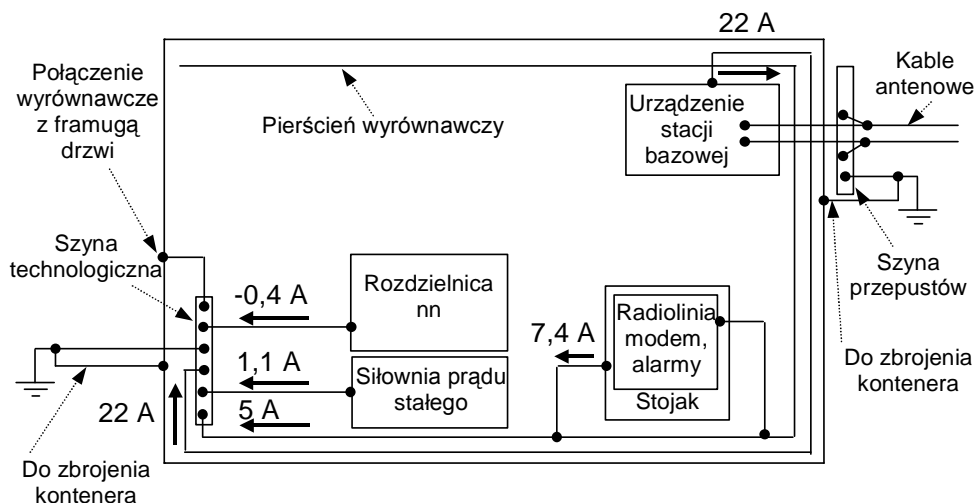


Rys. 5.13. Przebieg prądu płynącego w przewodzie uziemiającym jednego z kabli antenowych przy przepustach

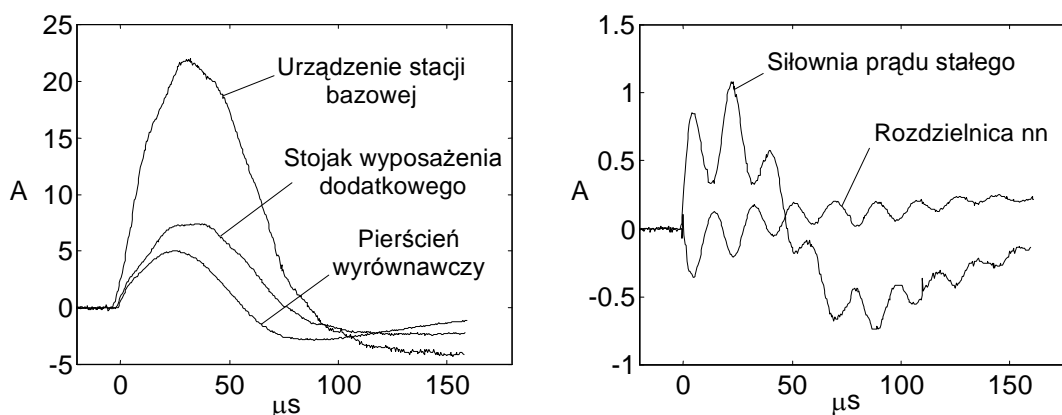
Wyniki pomiarów rozplywu prądów w systemie wyrównywania potencjałów wewnątrz kontenera przedstawiono schematycznie na rys. 5.14. Rysunek 5.15 przedstawia natomiast zarejestrowane przebiegi czasowe tych prądów.

Największe wartości prądów zarejestrowano w przewodach uziemiających urządzeń radiokomunikacyjnych, do których dołączone są kable antenowe, tj. w przewodach uziemiających urządzenia stacji bazowej oraz stojaka wyposażenia dodatkowego (m.in. radiolinia). Prąd odpływający ze stojaka wyposażenia dodatkowego stanowi główną składową prądu płynącego w pierścieniu wyrównawczym. Należy zaznaczyć, że do pierścienia wyrównawczego dołączona jest również (w kilku miejscach) półka kablowa biegnąca wzdłuż tego pierścienia ok. 0,5 m nad nim.

Dodatkowo, w przebiegach prądów płynących w przewodach uziemiających siłowni oraz rozdzielnic nn zaobserwowano oscylacje o częstotliwości 50 - 60 kHz (rys. 5.15).



Rys. 5.14. Rozpiływ prądów w systemie wyrównywania potencjałów w kontenerze

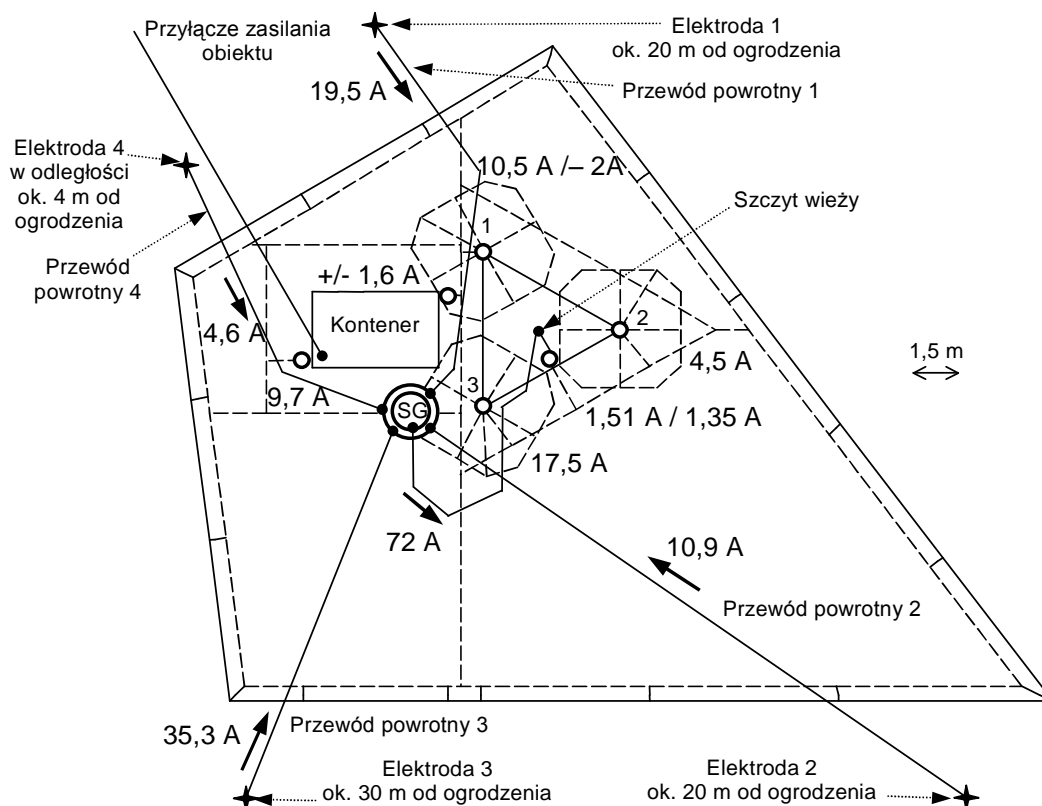


Rys. 5.15. Przebiegi prądów odprowadzanych do szyny technologicznej z przewodów uziemających urządzeń w kontenerze

Seria pomiarowa 2

Wyniki otrzymane w serii pomiarowej 2 przedstawiono na rys. 5.16 – 5.23. W tej serii do zamknięcia obwodu prądowego wykorzystano cztery przewody powrotne dołączone do elektrod umieszczonych w ziemi za ogrodzeniem stacji. Rozmieszczenie i wzajemne odległości poszczególnych elementów instalacji i konstrukcji stacji oraz generatora probierczego na rys. 5.16 odpowiadają rzeczywistemu ich rozmieszczeniu podczas pomiarów. Rozmieszczenie elektrod pomocniczych przedstawiono natomiast w sposób orientacyjny, podając jedynie przybliżone kierunki ich usytuowania oraz odległości od ogrodzenia stacji.

Na rysunku 5.16 podano wartości szczytowe prądów spływających do systemu uzimowego z przewodów uzimowych i uziemających słupów wsporczych wieży oraz szyn uziemających. W przypadku słupa wsporczego 1 wykonano oddzielnie pomiary prądów płynących w przewodzie uzimowym dołączonym do uzimu otokowego wieży (10,5 A) oraz w przewodzie uzimowym dołączonym do uzimu otokowego stopy fundamentowej (-2 A). Analogicznie, jak w serii pomiarowej 1, wartość szczytowa prądu płynącego w przewodzie uzimowym połączonym z otokiem stopy fundamentowej jest ujemna. Oznacza to, że część prądu wypływała z tego otoku, aby następnie wpłynąć do otoku wieży. Wartości podane przy każdym z pozostałych słupów wsporczych odpowiadają prądom płynącym w przewodach uziemających tych słupów (rys. 5.7 c)).

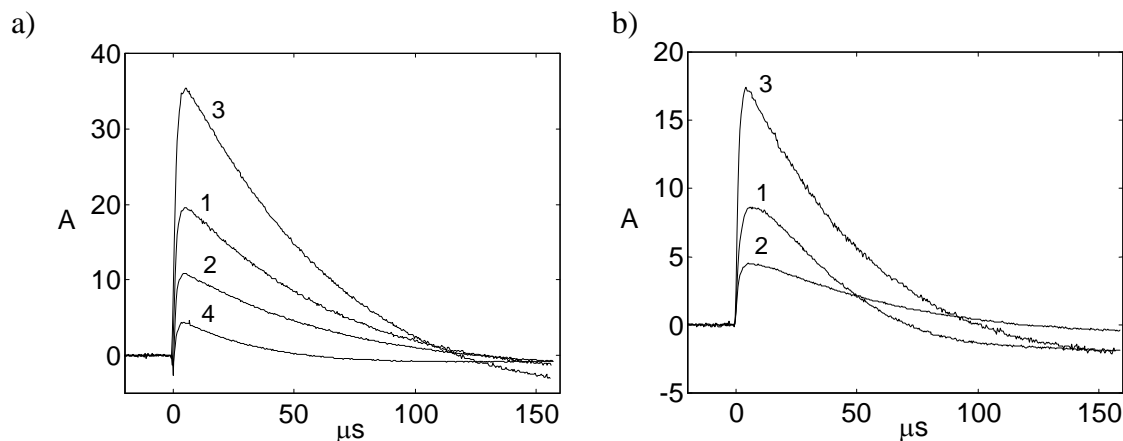


Rys. 5.16. Rozpływ prądów w przewodach uziomowych i uziemiających oraz w przewodach powrotnych łączących generator z elektrodami pomocniczymi

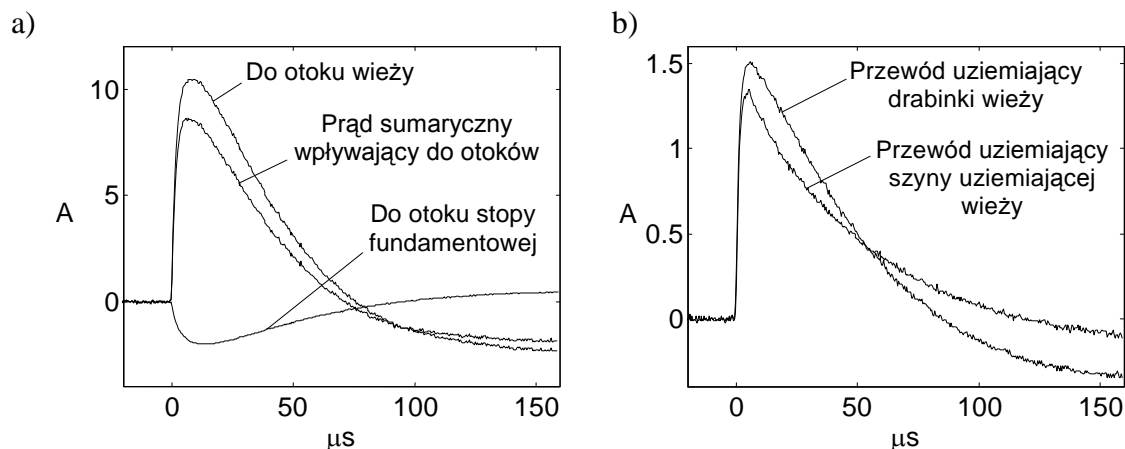
Dwie wartości przy drabince kablowej (1,51 A i 1,35 A) dotyczą prądów zmierzonych w przewodach uziemiających odpowiednio samej drabinki oraz szyny uziemiającej wieży (przewody łączące te elementy z zaciskiem probierczym pod nimi – rys. 5.7 a)).

Kształt prądu wpływającego do uziomu przewodem uziomowym pod szyną przepustów wykazywał pierwsze maksimum o wartości ok. 1,6 A, a następnie minimum ok. $-1,6$ A, co również zaznaczono na rys. 5.16 poprzez podanie obu tych wartości.

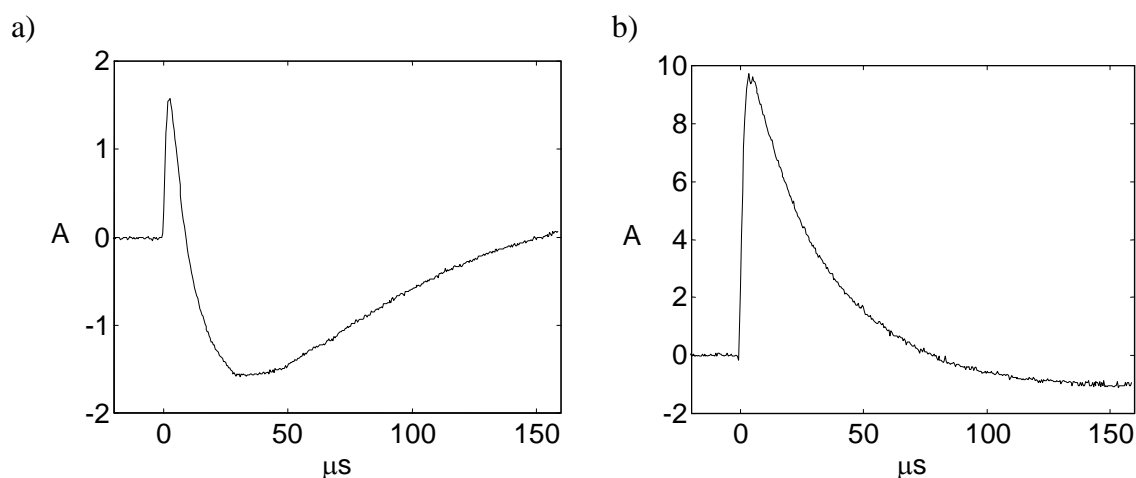
Rysunki 5.17 – 5.21 przedstawiają przebiegi czasowe zarejestrowanych prądów w wybranych miejscach na zewnątrz kontenera.



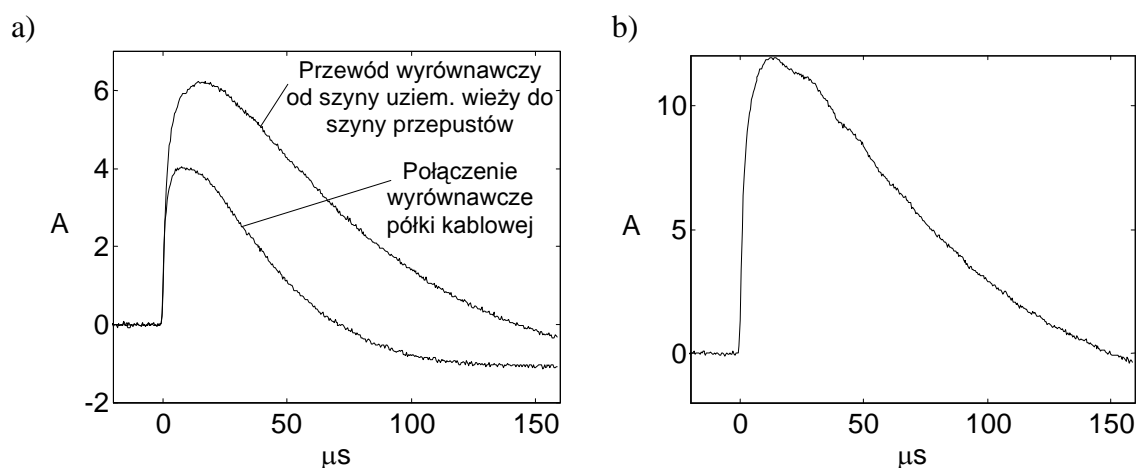
Rys. 5.17. Przebiegi prądów płynących w przewodach: a) powrotnych łączących generator z elektrodami; b) uziemiających słupów wsporczych wieży (w przypadku słupa 1 przebieg prądu otrzymano sumując prądy wpływające do uziomów otokowych wokół wieży oraz wokół stopy fundamentowej)



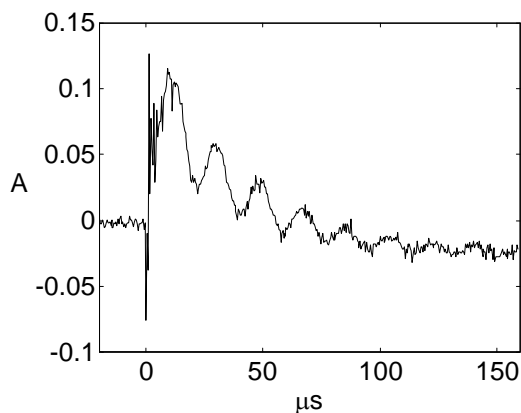
Rys. 5.18. Przebiegi prądów płynących w przewodach: a) uziomowych i uziemiającym słupie wsporczo 1 (prąd sumaryczny otrzymano sumując prądy wpływające do obu otoków); b) uziemiających drabinki kablowej i szyny uziemiającej wieży



Rys. 5.19. Przebiegi prądów zarejestrowane w przewodach uziomowych: a) pod szyną przepustów; b) pod szyną technologiczną

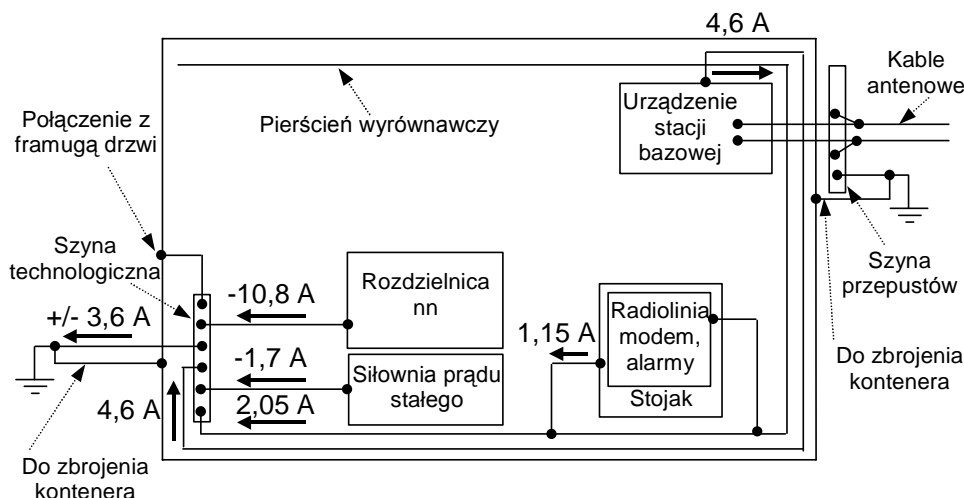


Rys. 5.20. Przebiegi prądów płynących: a) w przewodach wyrównawczych łączących szynę uziemiającą wieży oraz zewnętrzną półkę kablową z szyną przepustów; b) w przewodzie uziemiającym szyny przepustów

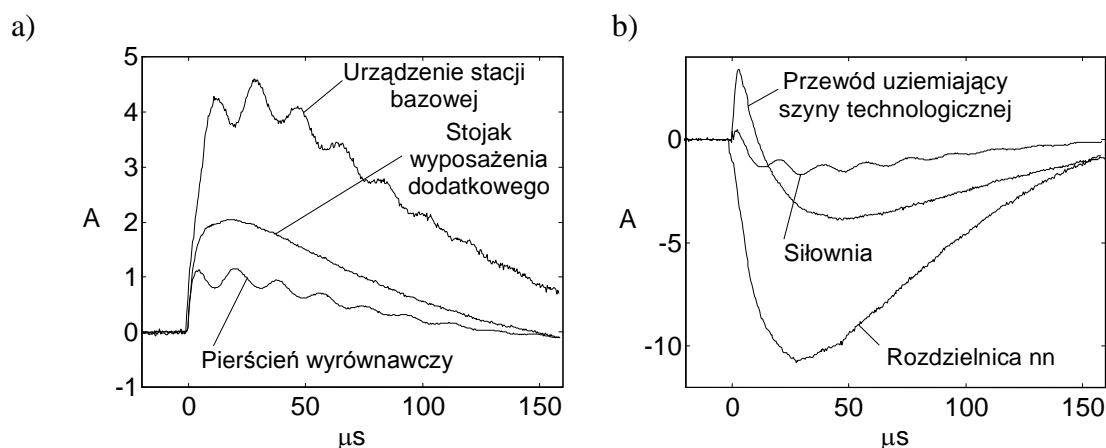


Rys. 5.21. Przebieg prądu płynącego w przewodzie uziemiającym jednego z kabli antenowych przy przepustach

Rozpływ prądów w systemie wyrównywania potencjałów wewnątrz kontenera przedstawiono schematycznie na rys. 5.22. Rysunek 5.23 przedstawia natomiast przebiegi czasowe prądów płynących w wybranych elementach tego systemu.



Rys. 5.22. Rozpływ prądów w systemie wyrównywania potencjałów w kontenerze

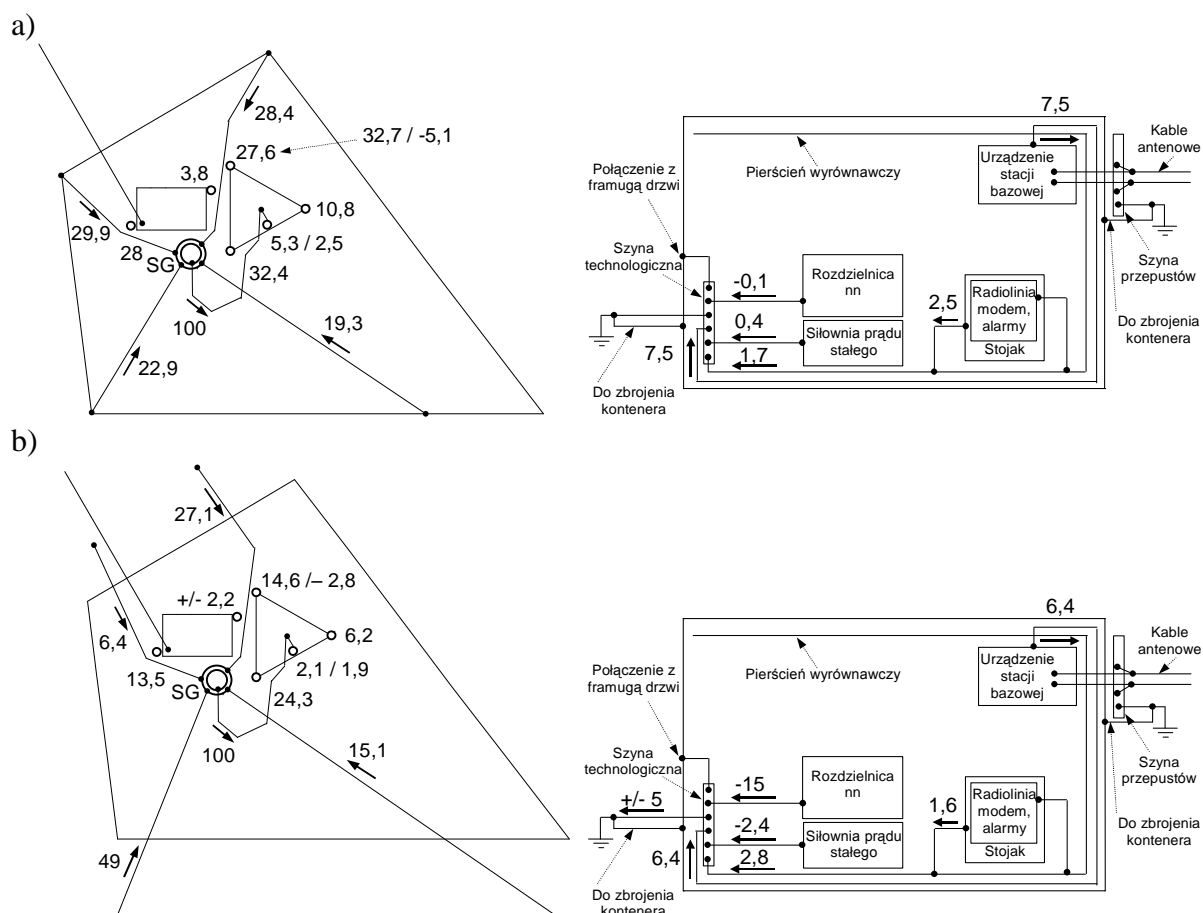


Rys. 5.23. Przebiegi prądów w wybranych elementach systemu wyrównywania potencjałów w kontenerze (prądy wpływające do szyny technologicznej z przewodów uziemiających urządzeń oraz prąd odpływający przewodem uziemiającym szyny)

W przypadku serii pomiarowej 2 prąd zarejestrowany w przewodzie uziemiającym rozdzielniczy nn ma stosunkowo dużą wartość w porównaniu z przypadkiem z serii 1 (ok. 15 % całkowitego prądu udarowego doprowadzanego z generatora do wierzchołka wieży) i jest zorientowany w stronę rozdzielniczy. Oznacza to, że znaczna część tego prądu mogła popłynąć w kierunku uziomu stacji transformatorowej. Należy zauważyć również, że przebieg prądu w przewodzie uziemiającym rozdzielniczy nn (prąd odprowadzany do uziomu stacji transformatorowej) a także przebiegi prądów w przewodach uziemiających urządzeń charakteryzują się większą zawartością składowych o niższych częstotliwościach, natomiast prądy odprowadzane do uziomu w samej stacji bazowej (przewody uziomowe słupów wsporczych wieży oraz szyn uziemiających), zawierają składowe o wyższych częstotliwościach. W przebiegach prądów płynących w przewodach uziemiających kabli antenowych i urządzeń w kontenerze, podobnie jak w serii 1, pojawiają się oscylacje o częstotliwości 50 – 60 kHz (rys. 5.21, 5.23).

Podsumowanie obu serii pomiarowych przeprowadzonych w stacji Karczmisko

Rozpływy prądów w przewodach uziomowych oraz w systemie wyrównywania potencjałów w kontenerze dla obu serii pomiarowych zestawiono na rys. 5.24. Podano wartości szczytowe prądów w procentach względem wartości szczytowej prądu doprowadzanego do wierzchołka wieży w danej serii pomiarowej.



Rys. 5.24. Rozpływy prądów w stacji Karczmisko, w procentach względem całości prądu udarowego wpływającego do wieży, dla pomiarów: a) serii 1; b) serii 2

Wartości szczytowe wszystkich zmierzonych prądów wpływających do uziomu w przypadku serii 2 uległy znaczącemu zmniejszeniu w porównaniu z przypadkiem serii 1. Wynika

to głównie z faktu, że w drugiej serii pomiarowej znaczna część prądu udarowego była odprowadzana przez elementy zbrojenia stóp fundamentowych wieży oraz przez uziom stacji transformatorowej. Ze względów technicznych nie dokonano pomiarów prądów odprowadzanych przez te elementy. Ponieważ jednak suma prądów wpływających do uziomu stacji, w przypadku serii 2, stanowi ok. 62 % całości prądu udarowego, można szacować, że pozostała część prądu (ok. 38%) odprowadzana jest poprzez zbrojenie fundamentów wieży oraz przez uziom stacji transformatorowej.

Obserwowana w obu seriach pomiarowych niesymetria w podziale prądów pomiędzy słupy wsporcze jest wynikiem rozmieszczenia (miejsca uziemienia) drabinki kablowej i szyny uziemiającej wieży oraz usytuowania przewodów doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy do/z wieży.

5.2.2. Stacja bazowa w Goniądzu

Wieża stacji o wysokości 50 m posiada trzy słupy wsporcze rozstawione na podstawie trójkąta oraz dodatkowy słup wsporczy pośrodku. Koncentryczne kable antenowe oraz izolowany przewód odprowadzająco-wyrównawczy ułożone są w drabince kablowej biegnącej wzdłuż środkowego słupa wsporczego wieży. Przewód odprowadzająco-wyrównawczy ma połączenia z konstrukcją wieży tylko u jej szczytu (poprzez szyny wyrównawcze) oraz u podstawy (poprzez szynę uziemiającą na dole wieży) i nie ma żadnych innych połączeń z konstrukcją wieży na całej swej długości.

Przewód odprowadzająco-wyrównawczy wykorzystano podczas badań do doprowadzenia prądu udarowego do wierzchołka wieży. W tym celu odłączono go od szyny uziemiającej wieży i połączono z zaciskiem wysokiego napięcia generatora udarowego. Prąd udarowy doprowadzony do szczytu wieży rozpląwał się w konstrukcjach wieży i kontenera, systemach wyrównywania potencjałów i uziomowym, i wracał czterema przewodami powrotnymi do generatora umieszczonego na ziemi obok wieży. Przewody powrotne łączono do ogrodzenia stacji lub do pomocniczych elektrod wbijanych w ziemię za ogrodzeniem.

Rysunek 5.25 przedstawia plan sytuacyjny stacji Goniądz oraz jej system uziomowy z zaznaczeniem najważniejszych elementów instalacji wyrównywania potencjałów i instalacji metalowych. Oznaczono również główne miejsca pomiarowe (okrągłe punkty na rys. 5.25 b)). Są to elementy instalacji, które łączą bezpośrednio ich części nadziemne i zakopane. Względy techniczne uniemożliwiły pomiary prądów odprowadzanych ze środkowego słupa wsporczego oraz drabinki kablowej i szyny uziemiającej wieży.

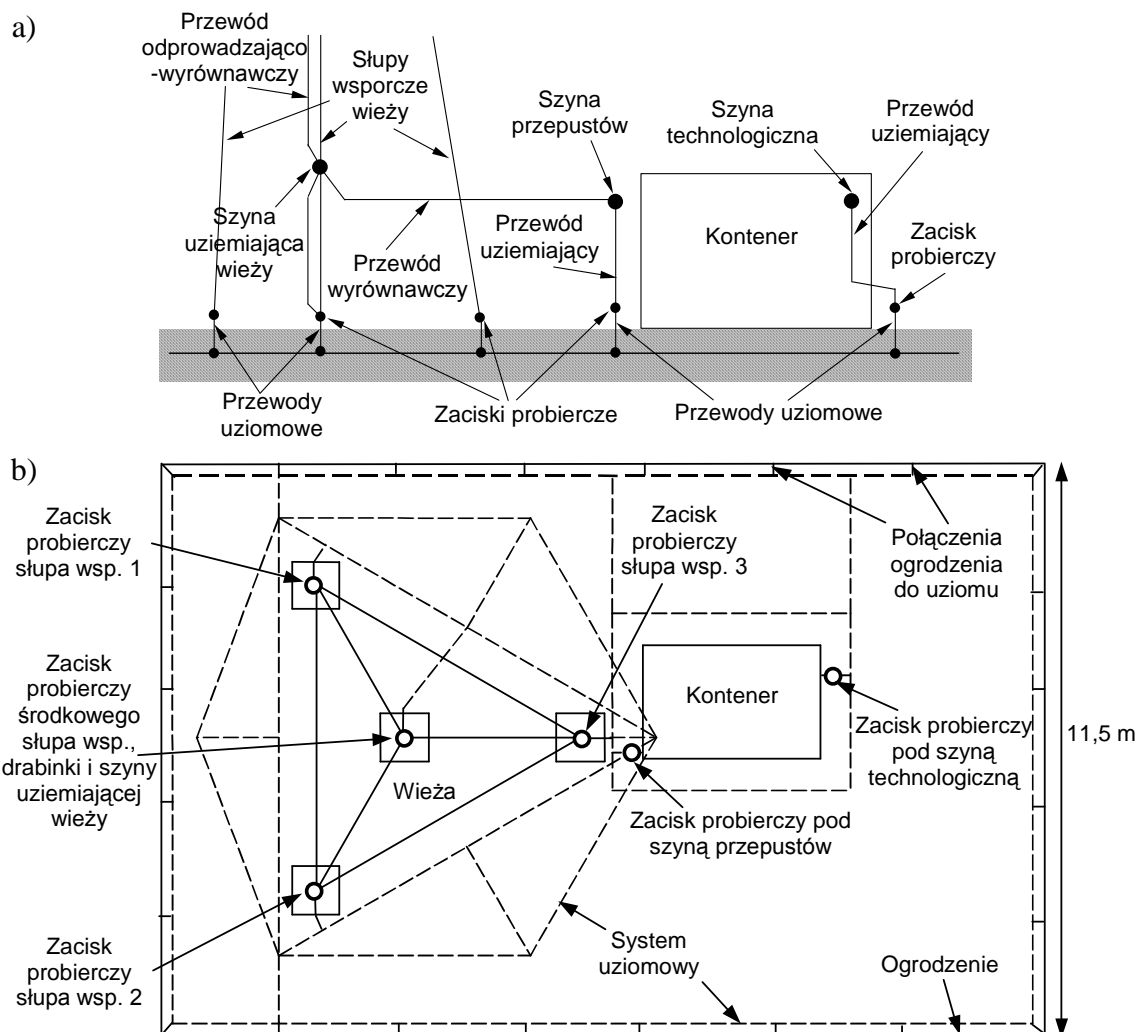
System uziomowy stacji składa się z połączonych uziomów otokowych wokół wieży i kontenera, uziomu otokowego wokół całego terenu stacji oraz dodatkowych uziomów poziomych (brak uziomów pionowych, poza elementami zbrojenia fundamentów wieży).

W tej stacji brak połączenia zbrojenia kontenera do zacisków probierczych znajdujących się pod szyną przepustów i pod szyną technologiczną (rys. 5.25 a)).

Wykonano dwie serie pomiarów, które można scharakteryzować następująco:

- seria pomiarowa 1 – prąd udarowy o wartości szczytowej 200 A i kształcie 12/42 μ s, przewody powrotne łączone do ogrodzenia stacji;
- seria pomiarowa 2 – prąd udarowy o wartości szczytowej 16 A i kształcie 1,2/48 μ s, przewody powrotne łączone do elektrod wbitych w ziemię za ogrodzeniem stacji.

Prądy rejestrowano w przewodach uziomowych słupów wsporczych wieży i szyn uziemiających kontenera (rys. 5.25), oraz w przewodach wyrównawczych i uziemiających na zewnątrz i wewnątrz kontenera. Szczegółowe wyniki pomiarów ze stacji Goniądz dostępne są częściowo w załączniku A oraz w publikacjach [62, 82]. Poniżej przedstawiono jedynie krótkie ich podsumowanie.



Rys. 5.25. Plan sytuacyjny oraz system uziomowy stacji Goniądz

W obu seriach pomiarowych w przebiegach prądów płynących w przewodzie wyrównawczym łączącym szynę uziemiającą wieży z szyną przepustów można zauważyć początkowe narastanie prądu a następnie pojawienie się impulsu o przeciwnym znaku.

Podobnie, jak w przypadku stacji Karczmisko, prądy rejestrowane w przewodach uziemiających urządzenia stacji bazowej, siłowni, wyposażenia dodatkowego, a w mniejszym stopniu także rozdzielniczy nn oraz kabli antenowych, charakteryzują się występowaniem oscylacji o częstotliwości 50 - 60 kHz (A.3 b), A.5, A.10 a)).

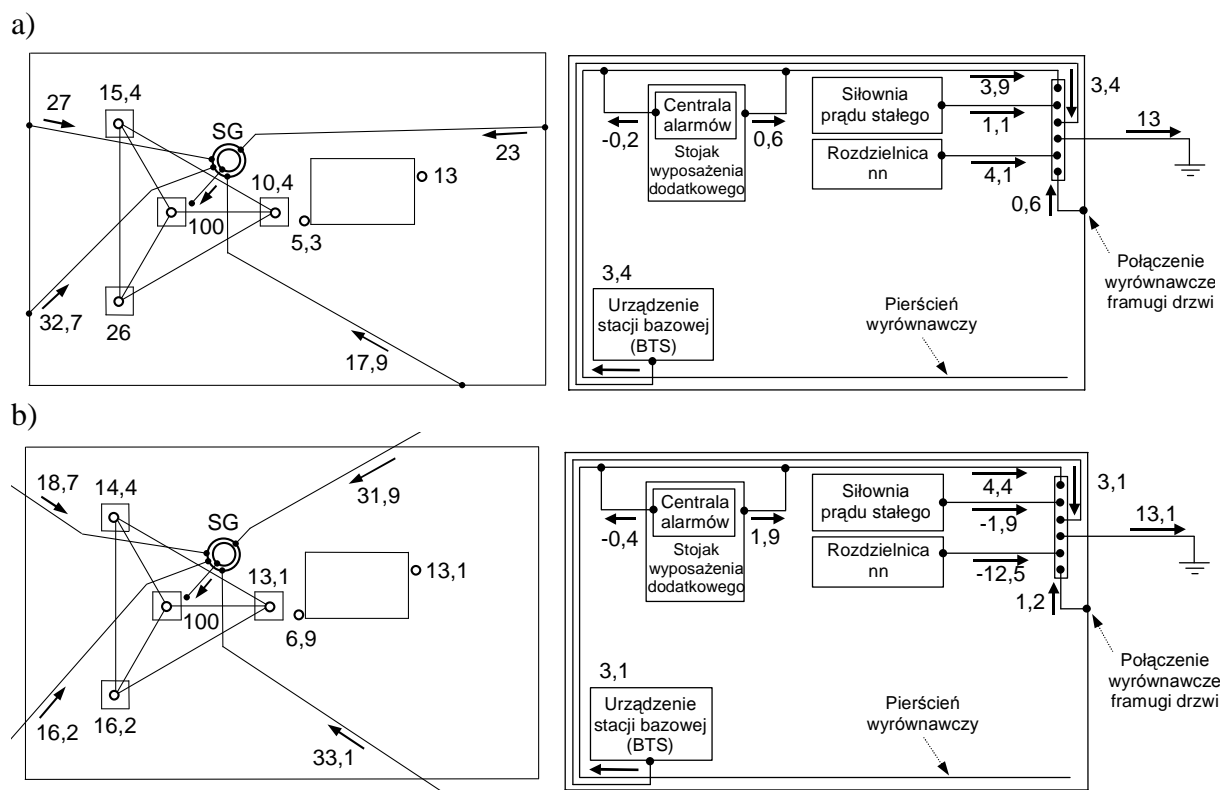
W przebiegach prądów serii pomiarowej 2 można zaobserwować ponadto oscylacje o częstotliwości ok. 1,1 MHz i niewielkiej amplitudzie, związane ze zjawiskami falowymi zachodzącymi w wieży, uziomach i/lub obwodach łączących generator udarowy z obiektem.

Podsumowanie obu serii pomiarowych przeprowadzonych w stacji Goniądz

Rozpływy prądów w przewodach uziomowych oraz w systemie wyrównywania potencjałów w kontenerze dla obu serii pomiarowych zestawiono na rys. 5.26. Podano wartości szczytowe prądów w procentach względem wartości szczytowej prądu udarowego doprowadzonego do wierzchołka wieży w danej serii pomiarowej.

Suma prądów wpływających do uziomu z przewodów uziomowych trzech bocznych słupów wsporczych wieży i szyn uziemiających kontenera dla serii pomiarowej 1 wynosi ok. 70 % całości prądu udarowego doprowadzonego do szczytu wieży. Pozostałe 30 % jest od-

prowadzane do uziomu przypuszczalnie poprzez środkowy słup wsporczy, drabinkę kablową i szynę uziemiającą wieży, oraz ewentualnie także przez elementy zbrojenia stopy fundamentowej (o ile są połączone z uziomem). Niesymetria podziału prądów pomiędzy słup 2 a słupy 1 i 3 jest wynikiem sposobu uziemienia środkowego słupa wsporcze (rys. 5.25 b)).



Rys. 5.26. Rozpływ prądów w stacji Goniądz, w procentach względem całości prądu udarowego z generatora, dla pomiarów: a) serii 1; b) serii 2

W serii pomiarowej 2 otrzymano równomierny podział prądów pomiędzy odprowadzenia słupów 1, 2 i 3 oraz szyny technologicznej (po kilkanaście procent). Suma prądów odprowadzanych do uziomów z trzech bocznych słupów wsporczych wieży oraz szyn uziemiających kontenera stanowi ok. 64 % całości prądu udarowego. Pozostała część prądu odprowadzana jest przez uziemienie środkowego słupa wsporcze, drabinki kablowej i szyny uziemiającej wieży oraz przez uziom stacji transformatorowej i zbrojenie fundamentów wieży.

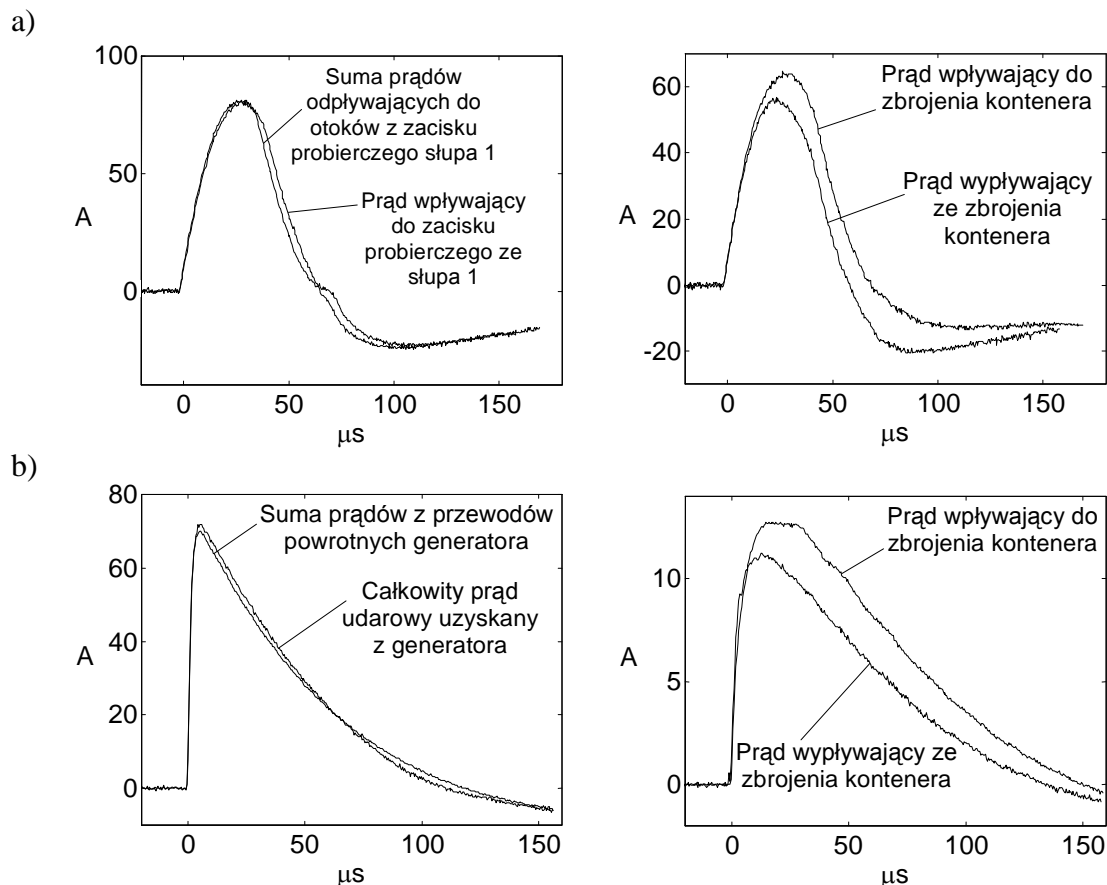
5.3. Analiza dokładności pomiarów

Biorąc pod uwagę specyfikę prowadzonych badań, dokonano pośrednio szacunkowej oceny powtarzalności oraz dokładności pomiarów. Podstawę tej oceny stanowiło porównanie przebiegów sumarycznych prądów udarowych wpływających do oraz wypływających z określonych węzłów lub części konstrukcji i instalacji obiektu. Przeanalizowano prądy wpływające do oraz wypływające z zacisków generatora probierczego, szyny technologicznej oraz zacisków probierczych słupów wsporczych wieży i szyn uziemiających kontenera (zbrojenie kontenera). W wybranych węzłach analizowano prądy otrzymane:

- bezpośrednio, przyjmując przebieg prądu zarejestrowany w pojedynczym przewodzie dołączonym do analizowanego węzła;
- pośrednio, poprzez zsumowanie w dziedzinie czasu prądów zarejestrowanych oddzielnie w poszczególnych przewodach dołączonych do analizowanego węzła.

Sumowanie przebiegów prądów udarowych w dziedzinie czasu jest w większości analizowanych przypadków uzasadnione, ponieważ różnice czasów opóźnień poszczególnych prądów docierających do analizowanych węzłów są niewielkie w porównaniu z wartością czasu narastania czoła tych prądów.

Porównywane przebiegi sumarycznych prądów w wybranych węzłach (częściach instalacji), otrzymane w seriach pomiarowych 1 i 2 w stacji Karczmisko przedstawiono odpowiednio na rys. 5.27 a) oraz b).



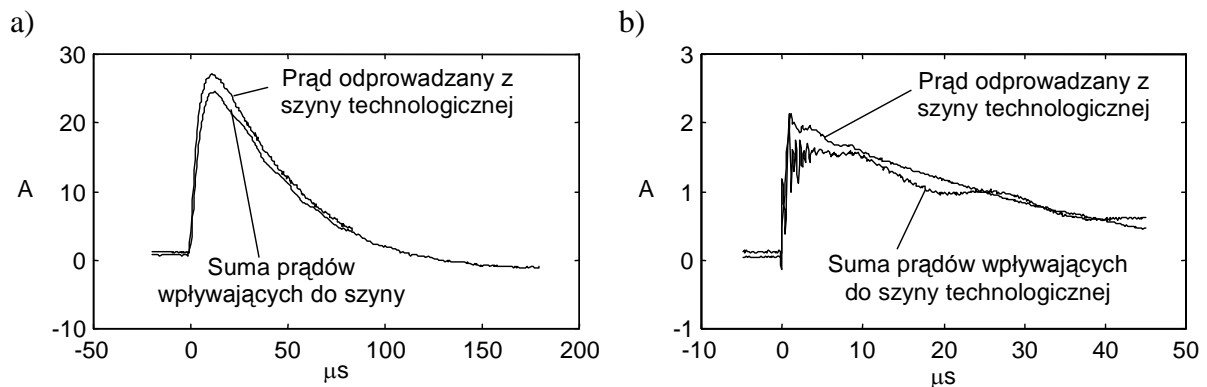
Rys. 5.27. Porównanie przebiegów sumarycznych prądów wpływających do i wypływających z wybranych węzłów i części instalacji w stacji Karczmisko dla pomiarów: a) serii 1; b) serii 2

Prąd wpływający do zacisku probierczego ze słupa wsporczego 1 zmierzono bezpośrednio w przewodzie uziemiającym tego słupa, natomiast przebieg przedstawiający sumę prądów odpływających do otoków z zacisku probierczego słupa 1 otrzymano sumując prądy zmierzone w przewodach uziomowych dołączonych do otoków wieży oraz stopy fundamentowej (rys. 5.7 c)). Podobnie, całkowity prąd udarowy uzyskany z generatora zmierzono w przewodzie doprowadzającym prąd do wieży, natomiast sumę prądów wyznaczono na podstawie prądów zarejestrowanych w poszczególnych przewodach powrotnych. Prądy wpływające do zbrojenia kontenera wyznaczono w węźle, który stanowi zacisk probierczy pod szyną przepustów, odejmując prąd zmierzony w przewodzie uziomowym od prądu zmierzonego w przewodzie uziemiającym szyny przepustów (rys. 5.7 a)). Natomiast prądy wypływające ze zbrojenia kontenera wyznaczono odejmując prąd zmierzony w przewodzie uziomowym szyny technologicznej od sumy prądów zmierzonych w poszczególnych przewodach uziemiających urządzeń i instalacji w kontenerze, za wyjątkiem prądu płynącego w przewodzie wyrównawczym metalowej framugi drzwi, którego nie zmierzono (rys. 5.24).

Porównywane przebiegi prądów wpływającego do i wypływającego z zacisku probierczego słupa 1 oraz wypływającego z i wpływającego do zacisków generatora probierczego są prawie identyczne, zarówno pod względem kształtów jak i wartości szczytowych.

W przypadku prądów wpływających do i wypływających ze zbrojenia kontenera, rozbieżność jest większa. Wynika ona z faktu, że w czasie pomiarów pominięto prądy płynące w przewodzie wyrównawczym metalowej framugi drzwi (rys. 5.24). Niewielka część prądu płynącego zbrojeniem kontenera zamykała się poprzez to połączenie do szyny technologicznej. Przepuszczalnie mogły istnieć także inne dodatkowe połączenia elementów zbrojenia kontenera z pozostałymi instalacjami metalowymi, których nie opisano w dokumentacji.

Przebiegi sumarycznych prądów otrzymane w seriach pomiarowych 1 i 2 w stacji Goniądz przedstawiono odpowiednio na rys. 5.28 a) oraz b). Odpowiednie prądy odprowadzane z szyny technologicznej zostały zmierzone bezpośrednio w przewodzie uziemiającym tej szyny (rys. 5.26). Przebiegi prądów wpływających do szyny technologicznej otrzymano sumując prądy spływające do tej szyny ze wszystkich przewodów uziemiających i wyrównawczych urządzeń i instalacji w kontenerze (z uwzględnieniem ich kierunków).



Rys. 5.28. Porównanie przebiegów sumarycznych prądów wpływających do i wypływających z szyny technologicznej w stacji Goniądz dla pomiarów: a) serii 1; b) serii 2

Różnica pomiędzy przebiegami prądów wpływającego do oraz wypływającego z szyny technologicznej dla serii pomiarowej 1 jest niewielka. Kształty obu przebiegów są podobne, natomiast wartości szczytowe różnią się nieznacznie. Rozbieżność przebiegów otrzymanych dla serii pomiarowej 2 jest natomiast większa. Powodem są obserwowane w tej serii zjawiska falowe (oscylacje o częstotliwości ok. 1 MHz), które w połączeniu z istotnymi, przy krótkich czasach czoła impulsu prądu udarowego, różnicami opóźnień fal rozchodzących się w wieży oraz w uziemiu, mogły być źródłem błędów związanych z sumowaniem przebiegów prądów w dziedzinie czasu, a nie błędów pomiaru. W rezultacie, przebieg przedstawiający sumę prądów wpływających do szyny technologicznej wykazuje znaczne oscylacje na czole.

Jako kryterium oceny dokładności pomiarów wartości szczytowych prądów przyjęto względną niepewność pomiarową N [113], która rozumiana jest tu jako średni kwadratowy uchyb odczytu [50] pojedynczej wartości szczytowej prądu, odczytanej na podstawie dwóch lub trzech porównywanych przebiegów prądów sumarycznych wpływających do oraz prądów wypływających z wybranych węzłów lub części instalacji, odniesiony do średniej wartości szczytowej wyznaczonej z tych przebiegów:

$$N = \frac{S_x}{x} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i} \quad (5.1)$$

gdzie:

- n – liczba porównywanych przebiegów;
- x_i – wartość szczytowa i -tego przebiegu;
- \bar{x} – średnia wartość szczytowa porównywanych przebiegów prądów;
- S_x – średni kwadratowy uchyb odczytu.

Obliczone niepewności pomiarowe wartości szczytowych porównywanych przebiegów prądów dla wybranych węzłów i/lub części instalacji w obu stacjach bazowych zestawiono w tabeli 5.1. Ze wspomnianych wyżej powodów, przy szacowaniu niepewności pomiarowych nie brano pod uwagę prądów wpływających do i wypływających ze zbrojenia kontenera w stacji Karczmisko oraz prądów wpływających do i wypływających z szyny technologicznej w serii pomiarowej 2 w stacji Goniądz.

Tablica 5.1. Zestawienie oszacowanych wartości niepewności pomiarowych wartości szczytowych porównywanych przebiegów prądów

Stacja bazowa	Seria pomiarowa	Analizowany węzeł lub część instalacji	Niepewność [%]
Karczmisko	Seria pomiarowa 1	Zacisk probierczy słupa 1	4,6
	Seria pomiarowa 2	Zaciski generatora	1,8
Goniądz	Seria pomiarowa 1	Szyna technologiczna	7,4

Otrzymano dobrą zgodność kształtów oraz wartości szczytowych prądów mierzonych w analizowanych węzłach oraz punktach pomiarowych stacji (słupy wsporcze wieży oraz szyna technologiczna kontenera). Niepewność odczytu wartości szczytowych prądów nie przekracza 7,5 % (tablica 5.1).

Poza omówionymi wyżej ograniczeniami, których nie brano pod uwagę przy szacowaniu niepewności pomiarowych, zaobserwowane rozbieżności w porównywanych przebiegach prądów oraz dokładność pomiarów mogły być determinowane także:

- brakiem szczegółowej informacji o konfiguracji instalacji w obiekcie i/lub nieuwzględnieniem wszystkich dróg podziału prądu udarowego (głównie zbrojenie kontenera oraz jego połączenia z innymi instalacjami metalowymi, okablowanie w kontenerze oraz szczegóły zbrojenia fundamentów wieży);
- przypadkową zmianą konfiguracji w obwodzie;
- zmianami kształtów oraz wartości szczytowych prądów udarowych wytwarzanych w warunkach polowych (zmiana warunków atmosferycznych, głównie temperatury powodująca zmiany parametrów elektrycznych systemu uziomowego, innych elementów instalacji i konstrukcji stacji i/lub obwodu formowania udarów generatora).

Należy przypomnieć, że pomiary w poszczególnych punktach stacji nie były wykonywane jednocześnie. W czasie pojedynczej serii pomiarowej generator pracował bez przerwy przez ok. dwie godziny wytwarzając udary co ok. 1 - 10 minut.

Przeprowadzono analizę powtarzalności udarów otrzymywanych z generatora probierczego w warunkach laboratoryjnych. Wykonano trzy serie pomiarów wartości szczytowej prądu otrzymywanego na 10 Ω rezystancji obciążenia generatora probierczego, zmieniając w każdej serii wartość napięcia ładowania generatora w zakresie od 250 V do 2 kV z krokiem równym 100 V. Pomiary prądu wykonywano przy pomocy oscyloskopu w połączeniu z wewnętrznym bocznikiem prądowym wbudowanym w generator oraz z sondą prądową używaną podczas badań terenowych. Częstość wytwarzania kolejnych udarów w serii 1 wynosiła średnio 6,5 min. a w seriach 2 i 3, średnio 1,5 min. Czas trwania serii 1 wynosił ok. 2,5 godz., serii 2 i

3 po ok. 35 min. Serie 1 i 2 wykonano w odstępach kwadrans, a serie 2 i 3 w odstępach dwugodzinnych.

Wyniki tych badań wskazują, że w kolejnych seriach pomiarowych prąd otrzymywany z generatora probierczego wzrastał, przy czym średni wzrost prądu w serii 3 w stosunku do serii 2 był wyraźnie mniejszy niż średni wzrost prądu w serii 2 w stosunku do serii 1 (odpowiednio ok. 2 % oraz ok. 4 %). Uzasadnić to można większą częstością powtarzania udarów w seriach 2 i 3, a więc wyższą temperaturą oraz lepszą stabilnością temperatury podczas tych pomiarów. W serii 1, przy dłuższym odstępach czasu pomiędzy kolejnymi udarami, mogło wystąpić znaczne schładzanie rezystora obciążającego oraz elementów obwodu formowania udarów generatora podczas przerw. Zmiany zewnętrznych warunków atmosferycznych podczas pomiarów terenowych mogły być przyczyną jeszcze większych wahań prądu udarowego uzyskiwanego z generatora.

Analizując rysunki 5.27 oraz 5.28, można zauważyć, że praktycznie we wszystkich przypadkach prądy odpływające z węzłów zmierzone bezpośrednio są większe niż prądy uzyskane z sumowania przebiegów prądów dopływających do węzłów. Można dopatrzeć się tu pewnej korelacji z kolejnością wykonywania pomiarów, np. w stacji Goniądz, mierzone jako pierwsze prądy dopływające do szyny technologicznej skutkowały niższą wartością sumarycznego prądu dopływającego do tej szyny w porównaniu z wartością prądu odpływającego z tej szyny, który zmierzono w następnej kolejności. Podobnie w stacji Karczmisko, suma prądów płynących w przewodach powrotnych, które zmierzono jako pierwsze, jest nieco mniejsza niż prąd w przewodzie „gorącym” generatora, który zmierzono jako następny.

5.4. Podsumowanie wyników badań

Przedstawione w niniejszym rozdziale wyniki badań terenowych rozplywu prądów udarowych dotyczą dwu reprezentatywnych stacji bazowych o zasadniczo podobnych rozwiązaniach systemów wyrównywania potencjałów oraz instalacji elektrycznych i telekomunikacyjnych, lecz o innych rozwiązaniach konstrukcyjnych wież antenowych, systemów uziomowych oraz sposobów uziemienia kontenerów technologicznych.

Badania terenowe obejmowały także pomiary rezystywności gruntu. Zastosowano metodę techniczną 4-zaciskową Wennera, przy czym pomiary prowadzono dla kilku różnych odległości oraz przy różnych kierunkach usytuowania elektrod pomiarowych. Uzyskane wyniki pomiarów analizowano pod kątem możliwie najwierniejszego odwzorowania ich za pomocą jednorodnych lub wielowarstwowych modeli gruntu o różnych wartościach rezystywności. W tym celu wyniki pomiarów w postaci zmian rezystywności gruntu w funkcji odległości umieszczania względem siebie elektrod pomiarowych aproksymowano krzywymi „schodkowymi” o stałych, uśrednionych wartościach rezystywności w kilku kolejnych podzakresach. Poszczególne podzakresy odległości umieszczania elektrod pomiarowych odpowiadają kolejnym warstwom wielowarstwowego modelu gruntu. W przypadku modelu jednorodnego, aproksymacja polegała na przyjęciu uśrednionej wartości rezystywności gruntu w całym zakresie zmian odległości rozmieszczania elektrod pomiarowych. Na podstawie tych analiz do dalszych badań wstępnie przyjęto następujące modele gruntu:

- jednorodny o rezystywności 1600 Ωm , dla stacji Goniądz;
- dwuwarstwowy o wartościach rezystywności warstw górnej (30 m grubości) oraz dolnej, odpowiednio ok. 260 Ωm oraz 1060 Ωm , dla stacji Karczmisko.

Sformułowane na podstawie analiz wyników badań terenowych spostrzeżenia, dotyczące właściwości obu stacji bazowych przy przepływie w ich konstrukcjach prądów udarowych, zestawiono w tablicach 5.2 oraz 5.3. Tablice te odpowiadają układom pomiarowym, w których przewody powrotne połączone były do ogrodzenia stacji oraz do elektrod pomocniczych wbitych w ziemię.

Tablica 5.2. Porównanie rozpliwów prądów udarowych w stacjach Karczmisko i Goniądz: układy pomiarowe, w których przewody powrotne dołączone były do ogrodzenia stacji.

Elementy konfiguracji lub instalacji stacji	Stacja Karczmisko	Stacja Goniądz
<ul style="list-style-type: none"> • Podobna zależność podziału prądu odprowadzanego przez słupy wsporcze wież od usytuowania przewodów doprowadzających prądy udarowe do wież. Przewody doprowadzające prąd ułożone były blisko słupa 3 w stacji Karczmisko oraz słupa środkowego w stacji Goniądz. • Podziały prądów pomiędzy pozostałe słupy wsporcze są już bardziej zależne od konfiguracji systemów uziomowych oraz od miejsc uziemienia drabinek kablowych i szyn uziemiających wież (rys. 5.7 b) i 5.25 b)). 	32,4 % (słup wsporczy 3)	30 % (środkowy słup wsporczy)
	rys. 5.24 a)	rys. 5.26 a)
<ul style="list-style-type: none"> • Wartości prądów odprowadzanych przez boczne słupy wsporcze wieży oraz przez szynę technologiczną, w odniesieniu do całkowitych prądów udarowych. • Główną przyczyną różnic w podziałach tych prądów w porównywanych stacjach jest obecność lub brak środkowego słupa wsporcze wieży. 	Większe rys. 5.24 a)	Mniejsze rys. 5.26 a)
<ul style="list-style-type: none"> • W stacji Karczmisko, zaobserwowano ponad dwukrotnie większe, w odniesieniu do stacji Goniądz, wartości prądów płynących w: <ul style="list-style-type: none"> - przewodzie uziomowym szyny technologicznej; - przewodzie uziemiającym urządzenie stacji bazowej. 	28 % 7,5 %	13 % 3,4 %
<ul style="list-style-type: none"> • W stacji Karczmisko, zaobserwowano mniejsze, w odniesieniu do stacji Goniądz, wartości prądów płynących w przewodach uziemiających: <ul style="list-style-type: none"> - kabli antenowych; - siłowni, rozdzielnic nn oraz pierścienia wyrównawczego. 	0,2 % (rys. 5.13) 0,4 / -0,1 / 1,7 % rys. 5.24 a)	0,75 % (rys. A.3b) 1,1 / 4,1 / 3,9 % rys. 5.26 a)
<ul style="list-style-type: none"> • Zmiany kształtów prądów, w odniesieniu do kształtów całkowitych prądów udarowych, płynących w: <ul style="list-style-type: none"> - przewodach wyrównawczych łączących szyny uziemiające wieży z szynami przepustów; - przewodach uziemiających kabli antenowych. 	Bez zasadn. zmian rys. 5.12 a) Zmiana rys. 5.13	Zmiana rys. A.3 a) Bez zasadn. zmian rys. A.3 b)

Opisane różnice w podziałach prądów w obu stacjach mogą być wynikiem:

- sposobu doprowadzenia prądu udarowego do wieży (miejsce wprowadzenia prądu, ułożenie przewodu doprowadzającego, użycie przewodu odprowadzająco-wyrównawczego w stacji Goniądz);
- odmiennych rozwiązań konstrukcyjnych wieży i instalacji na wieży (obecność lub brak środkowego słupa wsporcze, połączenie przewodu odprowadzająco-wyrównawczego z konstrukcją), systemów uziomowych, połączeń wyrównawczych zbrojenia kontenera do wspólnego systemu wyrównywania potencjałów itp.;
- przypuszczalnie odmiennych rozwiązań systemów zasilania.

Tablica 5.3. Porównanie rozplądów prądów udarowych w stacjach Karczmisko i Goniądz: układy pomiarowe, w których przewody powrotne połączono do elektrod pomocniczych wbitych w ziemię.

Elementy konfiguracji lub instalacji stacji	Stacja Karczmisko	Stacja Goniądz
<ul style="list-style-type: none"> Podział prądu odprowadzanego z wieży pomiędzy trzy słupy wsporcze. Takie podziały prądów związane są głównie z ułożeniem przewodu doprowadzającego prąd udarowy do wieży (blisko słupa wsporczego 3 w stacji Karczmisko, i centralne w stosunku do osi wieży w stacji Goniądz), oraz z określonymi konfiguracjami systemów uziomowych. 	Nierównomierny, od 6 % do 24 %, średnio po 14 % na każdy ze słupów wsporczych (rys. 5.24 b)	Równomierny, po 13 – 16 % na każdy ze słupów wsporczych (rys. 5.26 b)
<ul style="list-style-type: none"> Sumaryczne prądy odprowadzane do uziomów za pośrednictwem przewodów uziomowych trzech bocznych słupów wsporczych wieży i szyn uziemiających kontenerów, przewodów uziemiających rozdzielnic nn (przyłączy zasilania stacji transformatorowych) oraz, w przypadku stacji Karczmisko, przewodów uziemiających drabinki i szyny uziemiającej wieży. Pozostałe części prądów zamykały się poprzez: <ul style="list-style-type: none"> elementy zbrojenia stóp fundamentowych wieży; przewody uziomowe środkowego słupa wsporczego, drabinki i szyny uziemiającej wieży. 	77 % 23 %	76 % } 24 %
<ul style="list-style-type: none"> Otrzymano procentowo zbliżone wartości prądów: <ul style="list-style-type: none"> odprowadzanych do uziomów z zacisków probierczych po stronie szyn technologicznych; odprowadzanych do uziomów stacji transformatorowych (prądy wpływające do rozdzielnic nn). 	rys. 5.24 b) 13,5 % ok. 15 %	rys. 5.26 b) 13,1 % ok. 12 %
<ul style="list-style-type: none"> W stacji Karczmisko obserwuje się procentowo większe, w odniesieniu do stacji Goniądz, wartości prądów płynących w przewodach uziemiających: <ul style="list-style-type: none"> urządzenia stacji bazowej; siłowni; rozdzielnic nn. 	rys. 5.24 b) 6,4 % 2,4 % 15 %	rys. 5.26 b) 3,1 % 1,9 % 12,5 %
<ul style="list-style-type: none"> W stacji Karczmisko obserwuje się procentowo mniejsze, w odniesieniu do stacji Goniądz, wartości prądów płynących w przewodach uziemiających: <ul style="list-style-type: none"> kabli antenowych; pierścienia wyrównawczego. 	0,14 % (rys. 5.21) 2,8 %	1,9 % 4,4 %
<ul style="list-style-type: none"> Zmiany kształtów prądów, w odniesieniu do kształtów całkowitych prądów udarowych, płynących w przewodach wyrównawczych łączących szyny uziemiające wieży z szynami przepustów. 	Zmiana rys. 5.20 a)	Zmiana rys. A.8 b)
<ul style="list-style-type: none"> Zaobserwowane zjawiska falowe: odbicia następujące prawdopodobnie w wierzchołku wieży, na elementach uziomu stacji bazowej i/lub stacji transformatorowej oraz elektrodach pomocniczych. 	Brak	rys. A.7 b), A.10 a)

Po zmianie układów pomiarowych z obwodów, w których przewody powrotne łączone były z ogrodzeniem stacji na obwody z zamknięciem prądu przez ziemię, wartość prądu od-

prowadzanego z zacisku probierczego szyny technologicznej w stacji Goniądz nie uległa zasadniczej zmianie, natomiast w stacji Karczmisko zmalała dwukrotnie. W stacji Goniądz przy opisanej zmianie konfiguracji prąd wpływający do rozdzielnicy nn spowodował zmniejszenie wartości prądów płynących w przewodach uziomowych niektórych słupów wsporczych (głównie słup nr 3), nie zmieniając wartości prądu odprowadzanego do uziomu z szyny technologicznej (rys. 5.26). Nie spowodowało to również znaczących zmian wartości szczytowych prądów płynących w przewodach uziemiających urządzenia stacji bazowej, siłowni oraz pierścienia wyrównawczego. W stacji Karczmisko prąd odpływający do rozdzielnicy nn skompensowany został przez mniejsze wartości prądów odprowadzanych do uziomu ze wszystkich słupów wsporczych oraz szyn uziemiających (w niektórych przypadkach nawet dwukrotnie, rys. 5.24). Zmianie uległy również wartości prądów płynących w przewodach uziemiających urządzenia stacji bazowej, siłowni i pierścienia wyrównawczego.

Specyficzne cechy rozplywów prądów udarowych w obu stacjach, zaobserwowane przy zmianie układów doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy na obwody z zamknięciem prądu przez ziemię, mogą być wynikiem zasadniczo różnych właściwości gruntów (rezystywność), uziomów stacji transformatorowych, rozmieszczenia elektrod pomocniczych i/lub specyficznych rozwiązań konstrukcyjnych badanych stacji.

Właściwości rozplywów prądów udarowych w przypadku zastosowania różnych układów pomiarowych (przewody powrotne połączone do ogrodzenia lub do elektrod pomocniczych) mają odmienny charakter.

W przypadku przewodów powrotnych dołączonych do ogrodzenia, bardziej ujawnia się wpływ różnic w rozwiązaniach konstrukcji i instalacji stacji. Zestawione w tablicy 5.2 cechy rozplywów prądów udarowych są tylko w ograniczonym stopniu zależne od sposobu doprowadzenia prądu udarowego do wieży. W znacznej mierze wynikają ze specyficznych rozwiązań konstrukcyjnych badanych stacji, takich jak konfiguracja uziomu, brak lub obecność dodatkowego słupa wsporcze wieży, sposób uziemiania zbrojenia lub konstrukcji kontenera oraz przypuszczalnie także specyficzne rozwiązania systemów zasilania w kontenerze.

Wpływ właściwości gruntu (ewentualne lokalne zmiany rezystywności) oraz właściwości uziomów (stacji bazowej oraz stacji transformatorowej) może być uwzględniony tylko w układzie z przewodami powrotnymi połączonymi do elektrod pomocniczych. Otrzymane w takim układzie rozplywy prądów są mniej wrażliwe na indywidualne różnice konfiguracji elementów konstrukcji i instalacji stacji (podział prądów pomiędzy słupy wsporcze wieży oraz szynę technologiczną), ponieważ napięcie generatora probierczego odkłada się głównie w ziemi.

We wszystkich badanych stacjach (we wszystkich seriach pomiarowych) w przebiegach prądów w instalacjach wyrównywania potencjałów w kontenerze (głównie przewody uziemiające urządzenia stacji bazowej, siłowni, rozdzielnicy nn, kabli antenowych, wyposażenia dodatkowego oraz pierścienia wyrównawczego) zaobserwowano oscylacje o częstotliwości 50 - 60 kHz. Są one prawdopodobnie wynikiem zjawisk rezonansowych powstających w obwodach urządzeń zainstalowanych w stacji w warunkach pobudzenia ich przez rozplywający się prąd udarowy.

Uwagi i wnioski wynikające z porównania zastosowanych metod pomiarowych zestawiono w tablicy 5.4.

Tablica 5.4. Podsumowanie stosowanych metod pomiarowych

Metoda pomiarowa	Uwagi dotyczące metody pomiarowej
Przewody powrotne połączone z ogrodzeniem stacji	<ul style="list-style-type: none"> • Stanowi wyczerpujące źródło informacji o rozplywie prądu udarowego w przewodzących elementach badanej stacji dla danego kształtu prądu. • Pozwala dokładnie ocenić wpływ różnic w rozwiązaniach konstrukcyjnych wszelkich instalacji metalowych stacji na rozplyw prądów udarowych. • Prądy udarowe nie wpływają do instalacji dochodzących do badanej stacji z innych obiektów (np. instalacje elektryczne lub telekomunikacyjne). • Możliwe jest uwzględnienie zjawisk falowych zachodzących w wieży, w systemie uziomowym badanej stacji i/lub w obwodach doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy. • Możliwość otrzymania prądów udarowych o znacznych wartościach (kilkaset amperów) i czasach czoła ok. kilku mikrosekund.
Przewody powrotne połączone z dodatkowymi elektrodami wbitymi w ziemię	<ul style="list-style-type: none"> • Jest mniej wrażliwa na indywidualne różnice w rozwiązaniach konstrukcyjnych instalacji metalowych stacji. • Pozwala na uwzględnienie rzeczywistych właściwości gruntu (ewentualne lokalne zmiany rezystywności) oraz właściwości uziomów badanej stacji i innych obiektów połączonych z nią przez instalacje zewnętrzne. • Uwzględniane są w badaniach prądy udarowe wpływające do instalacji dochodzących do badanej stacji z innych obiektów. • Pozwala na pomiary rozplywu prądów udarowych w badanej stacji oraz dochodzących do niej instalacjach zewnętrznych, bez zniekształceń wprowadzanych przez odbicia od węzłów obwodów doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy, dla prądów o czasach czoła rzędu kilku mikrosekund. Czas ten może ulec zmianie dla innych rezystywności gruntu lub przy innym wzajemnym usytuowaniu elektrod pomocniczych, badanej stacji, innych połączonych z nią obiektów oraz generatora probierczego. • Otrzymywane prądy udarowe charakteryzują się niższymi wartościami szczytowymi oraz krótszymi czasami narastania czoła.
Obie metody	<ul style="list-style-type: none"> • Żadna z zastosowanych metod pomiarowych nie odwzorowuje rzeczywistego rozplywu prądu pioruna (zależność od usytuowania przewodów doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy do/z obiektu oraz przypuszczalnie także od rozmieszczenia elektrod pomocniczych, odległości innych obiektów połączonych z badaną stacją, kształtu prądu udarowego itp.). Odwzorowanie takiego rozplywu prądów nie było jednak zasadniczym celem prowadzonych badań terenowych. • Obie metody umożliwiają z zadawalającą dokładnością (rozdz. 5.3) dokonanie pomiarów rozplywu prądów udarowych w głównych przewodzących elementach konstrukcji i instalacji stacji bazowej. • Otrzymane przy użyciu obu metod wyniki pomiarów rozplywów prądów udarowych oraz przebiegi czasowe tych prądów, stanowią użyteczne źródło informacji o właściwościach badanej stacji oraz innych połączonych z nią obiektów/systemów przy przepływie prądów udarowych. • Metody mogą być wykorzystane w małych stacjach bazowych, nawet w czasie normalnej pracy stacji. • Umożliwiają prowadzenie na szeroką skalę badań właściwości stacji bazowych oraz dołączonych do niej instalacji innych obiektów przy przepływie prądów udarowych.

6. Weryfikacja modeli numerycznych

Zgodnie z przyjętymi założeniami, w dalszej części pracy wyniki badań terenowych będą stanowiły źródło informacji o analizowanym obiekcie oraz dochodzących do niego instalacjach innych obiektów. Zostaną one zastosowane do:

- weryfikacji opracowanych modeli numerycznych układu generator – stacja bazowa;
- uproszczenia modeli numerycznych stacji bazowej, które w dalszej części pracy będą wykorzystywane do analizy zjawisk zachodzących podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego w wieżę stacji.

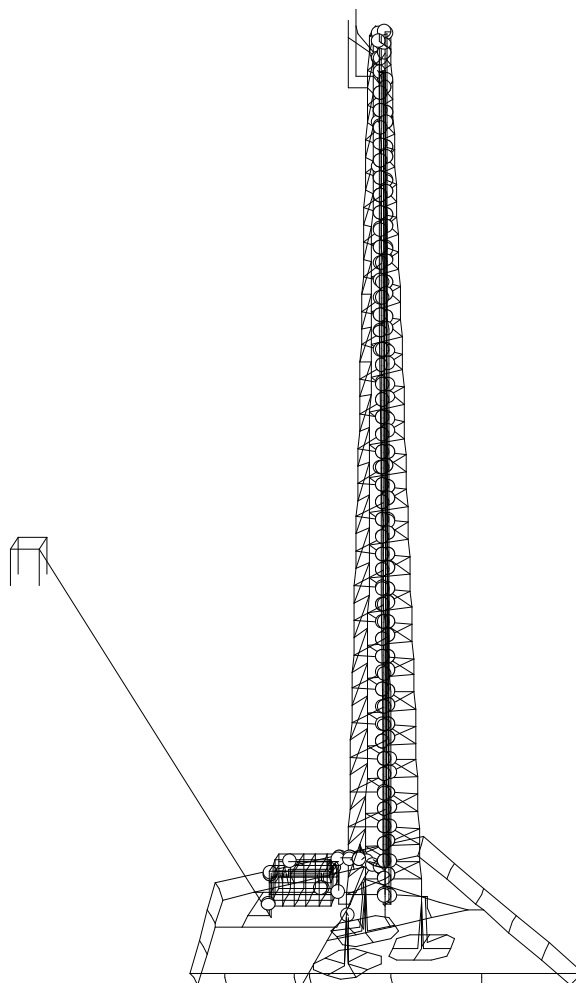
W tym celu porównano wyniki badań terenowych z wynikami analiz numerycznych modeli o różnym stopniu odwzorowania szczegółów konstrukcji i instalacji stacji, różnych właściwościach gruntu, różnych wariantach zastosowanej metody pomiarowej oraz różnych sposobach wymuszeń przepływu prądu udarowego.

Ze względu na fakt posiadania najbardziej szczegółowych informacji o stacji Karczmisko, analizy przedstawione w dalszej części pracy będą dotyczyły tej stacji bazowej.

6.1. Ogólny opis modeli matematycznych

Rozbudowany model numeryczny stacji Karczmisko, nazywany w dalszej części pracy **modelem nr (1)**, przedstawiono na rys. 6.1. Model ten, zbudowany z prostoliniowych cylindrycznych przewodów o odpowiednich właściwościach elektrycznych, tworzą:

- stalowa konstrukcja wieży: trzy słupy wsporcze rozstawione na podstawie trójkątnej oraz kratownica łącząca słupy wsporcze;
- system uziomowy stacji bazowej (stal ocynkowana): uziomy otokowe wokół wieży, kontenera i wokół całej stacji wzdłuż ogrodzenia (zakopane na głębokości 0,6 m), uziomy otokowe wokół poszczególnych stóp fundamentowych wieży (ułożone na głębokości 3,2 m) oraz poziome i pionowe elementy łączące otoki;
- uziom stacji transformatorowej: otok (zakopany na głębokości 0,7 m) z czterema elektrodami pionowymi (długości 2,5 m) w narożach; w odległości 66 m od stacji bazowej;
- uproszczony model ogrodzenia stacji: pierścień opasujący teren stacji na wysokości 40 cm nad ziemią łączony do uziomu otokowego wokół stacji co kilka metrów;
- zbrojenie fundamentów wieży: stalowe pręty długości ok. 3,5 m połączone do słupów wsporczych wieży oraz do poszczególnych uziomów otokowych wokół stóp fundamentowych;
- zbrojenie kontenera: stalowe pręty tworzące prostopadłościenną siatkę o wymiarach oka ok. 85x85 cm i 85x80 cm;
- drabinka kablowa wzdłuż wieży oraz pomiędzy wieżą a przepustami kablowymi na kontenerze (stal): dwie lub cztery belki wzdłużne łączone pomiędzy sobą co kilka - kilkanaście metrów elementami poprzecznymi oraz łączone do wieży co ok. 1 m;
- uproszczony model półki kablowej wewnątrz kontenera (pojedyncze przewody);
- dwa zwody pionowe o wysokości 2 m na szycie wieży oraz przewód odprowadzający wyrównawczy ułożony wzdłuż drabinki kablowej, łączony do konstrukcji wieży co ok. 10 m (miedź);



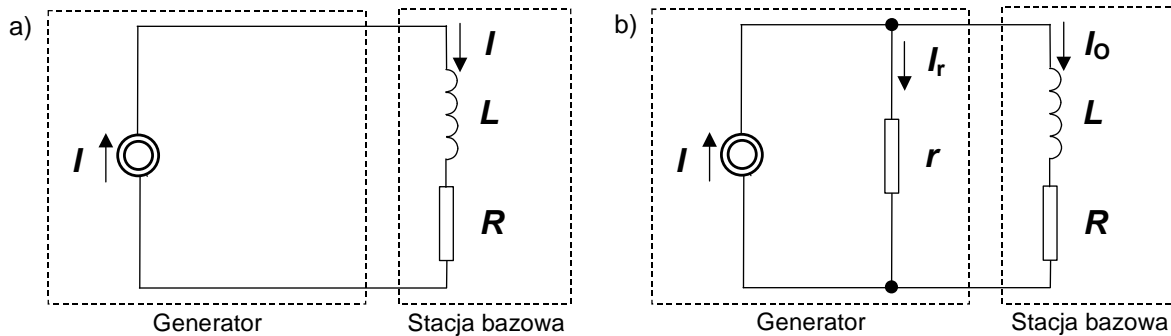
Rys. 6.1. **Rozbudowany model numeryczny stacji Karczmisko – model nr (1)**

- miedziane przewody wyrównawcze, uziemiające i uziomowe, na zewnątrz kontenera, według opisu z rozdziału 5.2.1;
- miedziane elementy systemu wyrównywania potencjałów wewnątrz kontenera: pierścień wyrównawczy otwarty, przewody uziemiające itp., według opisu z rozdziału 5.2.1;
- połączenie do stacji transformatorowej w postaci izolowanego miedzianego przewodu ułożonego w ziemi na głębokości 70 cm;
- modele płaszczy sześciu kabli antenowych: cylindryczne przewody o wewnętrznej i zewnętrznej średnicy odpowiednio 36 mm i 40 mm;
- model ekranu kabla antenowego radiolinii/radiomodemu: cylindryczny przewód o średnicach wewnętrznej i zewnętrznej odpowiednio 4 mm i 6 mm;
- wybrane przewody instalacji zasilających urządzeń w kontenerze: przewody ochronne, przewody powrotne +48 V instalacji zasilającej w prąd stały (w konfiguracji wspólnej względem wspólnego systemu wyrównywania potencjałów – rozdział 3.2), oraz kompletny dwużyłowy przewód zasilający w prąd stały ułożony pomiędzy urządzeniem stacji bazowej (BTS) a siłownią (dwie równoległe żyły w odległości ok. 3 mm od siebie, zwarte po stronie siłowni i rozwarne po stronie urządzenia stacji bazowej);
- kabel sygnałowy w kontenerze, długości ok. 2 m (para równoległych przewodów odległych o ok. 2 mm) zakończony na obu końcach rezystorami 100 Ω , nie uziemiony.

Analizowano także zjawiska zachodzące w modelach o różnym stopniu uproszczenia elementów konstrukcji i instalacji. Modele uproszczone opracowano w celu skrócenia czasu obliczeń. Jest to szczególnie istotne w przypadku analizy następnych wyładowań pioruno-

wych, dla których czas obliczeń znacznie się wydłuża ze względu na dużą liczbę segmentów potrzebnych do spełnienia warunku liniowego rozkładu prądu wzdłuż segmentów oraz dużą liczbę częstotliwości wymaganą do reprezentacji przebiegu prądu wyładowania (rozdział 4.3).

W obliczeniach numerycznych rozptyłów prądów udarowych, w miejsce generatora probierczego zastosowano źródło prądowe. Analizowano przypadki źródła idealnego oraz źródła rzeczywistego (stratnego) o impedancji wewnętrznej równej 2Ω . Odpowiednie schematy zastępcze modelowanego układu generator - stacja bazowa dla obu wariantów źródeł prądu udarowego przedstawiono na rys. 6.2 (oznaczenia na rysunku odpowiadają wartościom zespolonym).



Rys. 6.2. Schemat zastępczy obwodu z idealnym (a) oraz rzeczywistym (b) źródłem prądu; r – rezystancja wewnętrzna źródła prądu; R, L – zastępcza rezystancja oraz indukcyjność obciążenia (obwodu stacji bazowej lub stacji bazowej i ziemi)

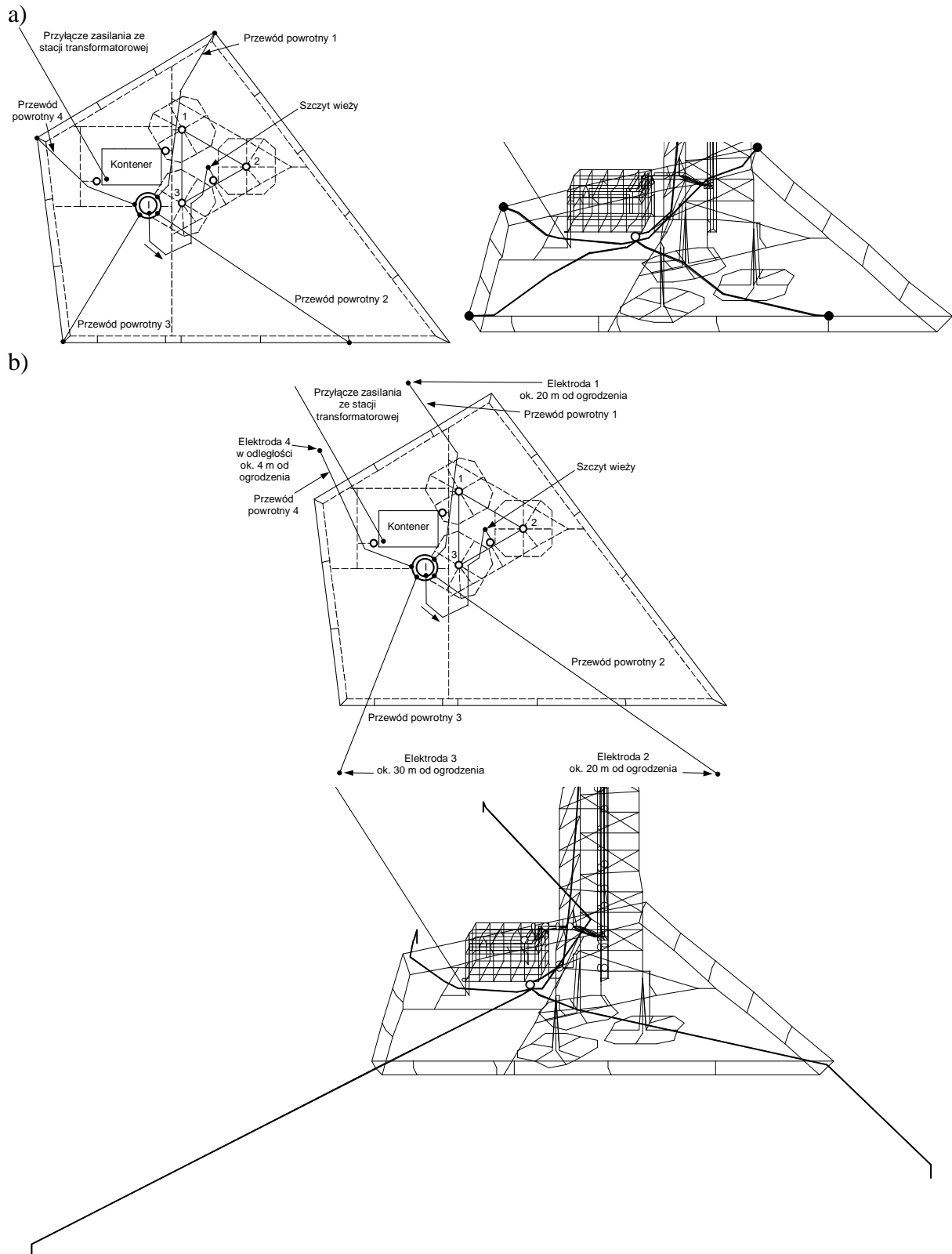
W przypadku źródła idealnego (rys. 6.2 a)), jako przebieg czasowy prądu źródła $i(t)$ przyjmowano zarejestrowany podczas pomiarów przebieg prądu udarowego doprowadzanego do wierzchołka wieży lub sumę przebiegów prądów zarejestrowanych w przewodach powrotnych. W obliczeniach ze źródłem rzeczywistym (rys. 6.2 b)) wymagane było wstępne wyznaczenie przebiegu prądu $i(t)$ tak, aby uzyskać zadany przebieg prądu w obciążeniu $i_o(t)$, zgodny z zarejestrowanym przebiegiem prądu udarowego doprowadzanego do wierzchołka wieży lub sumą przebiegów prądów zarejestrowanych w przewodach powrotnych.

W celu wyznaczenia nieznanego przebiegu prądu $i(t)$, obliczenia ze źródłem rzeczywistym prowadzono dwuetapowo. W pierwszym etapie wyznaczono charakterystykę widmową $k(f)$, opisującą zależność prądu obciążenia I_o od prądu źródła I dla każdej częstotliwości z widma zadanego przebiegu prądu obciążenia $i_o(t)$. Przyjęto przy tym wymuszenie o jednostkowej amplitudzie i zerowym przesunięciu fazowym dla każdej harmonicznej: $I = 1 + j0$. W drugim etapie przeprowadzono właściwe obliczenia, w których nieznaną prąd $i(t)$ opisano jego charakterystyką widmową $I(f)$ otrzymaną jako iloraz widma zadanego przebiegu prądu obciążenia $I_o(f)$ przez charakterystykę $k(f)$:

$$I(f) = \frac{I_o(f)}{k(f)} \quad (6.1)$$

Zadany przebieg prądu obciążenia $i_o(t)$ przyjęto jak w przypadku źródła idealnego.

Sposoby rozmieszczenia źródeł prądu oraz przewodów doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy do/z obiektu dla obu wariantów zastosowanej metody pomiarowej przedstawiono na rys. 6.3. Przewód doprowadzający prąd udarowy do wierzchołka wieży ułożono wzdłuż jednego z boków wieży, pomiędzy słupami wsporczyimi 2 i 3 (według opisu z rozdziału 5.2.1).



Rys. 6.3. Sposób rozmieszczenia źródła prądu oraz przewodów doprowadzających/odprowadzających prąd uderowy do/z obiektu dla przypadków, w których przewody powrotne dołączono do: a) ogrodzenia stacji; b) elektrod pomocniczych

Uwzględniając wyniki pomiarów rezystywności gruntu, do obliczeń numerycznych przyjęto jako podstawowy dwuwarstwowy model gruntu, w którym górna warstwa sięgająca

głębokości 30 m charakteryzowała się rezystywnością ok. 260 Ωm , dolna warstwa rezystywnością ok. 1060 Ωm (rozd. 5.4). W modelu tym nie zakładano wiernego odtworzenia rzeczywistej struktury gruntu, a jedynie odzwierciedlenie z możliwie małym błędem wyników pomiarów rezystancji gruntu. W dalszej części pracy model ten będzie określany w skrócie **modelem dwuwarstwowym 260/1060 Ωm** . Analizowano również przypadki gruntów jednorodnych o wartościach rezystywności od 200 Ωm do ok. 1300 Ωm . Przyjęto względną przenikalność dielektryczną równą 9 oraz względną przenikalność magnetyczną równą 1.

Do modelowania zjawisk zachodzących podczas rzeczywistych wyładowań piorunowych w obiekty, można zastosować istniejące w programie HIFREQ zewnętrzne źródło prądowe „lead” [140, 141]. Koncepcja tego źródła oparta jest na założeniu, że zadany prąd źródła wpływa do modelowanej konstrukcji z innej nie zamodelowanej instalacji. W odróżnieniu od konwencjonalnego źródła prądu, które będzie zastosowane do weryfikacji modeli numerycznych (rys. 6.2), zewnętrzne źródło prądu „lead” nie wymaga zamknięcia drogi powrotnej prądu, dzięki czemu otrzymuje się znaczne skrócenie czasu obliczeń. Źródło to będzie w dalszej części pracy nazywane „**źródłem zewnętrznym**”. Ponieważ będzie ono wykorzystywane w modelowaniu zjawisk zachodzących podczas wyładowań piorunowych, w niniejszym rozdziale porównano właściwości tego źródła z właściwościami źródła konwencjonalnego (z koniecznością zamknięcia obwodu prądu źródła).

Weryfikację modeli stacji bazowej przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów rozpyłów prądów udarowych. Zwrócono również uwagę na wartości napięć powstających na zaciskach generatora probierczego. Ocena zagrożenia piorunowego urządzeń w przypadku analizowanej stacji bazowej wymaga zwrócenia szczególnej uwagi na spadek napięcia powstający pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera. Będzie on bowiem determinował napięcia wynoszone do interfejsów urządzeń poprzez systemy okablowania. Dlatego w niniejszym rozdziale analizowana jest także ta wielkość.

Wstępne wyniki obliczeń wskazują, że otrzymywane w programie HIFREQ wartości spadków napięć mogą być jednak obciążone poważnymi błędami. Sygnalizują to również sami twórcy programu, proponując równocześnie rozwiązanie [143]. Zgodnie z nim całkowity spadek napięcia pomiędzy dwoma punktami a i b modelowanej konstrukcji rozumiany jest jako suma skalarnej różnicy potencjałów (pierwszy składnik w równaniu (4.12)) oraz tzw. składowej indukowanej napięcia (ang. induced voltage [143]), która otrzymywana jest w wyniku całkowania potencjału wektorowego Hertz’a wzdłuż zdefiniowanej drogi leżącej na powierzchni przewodów i łączącej punkty a i b (drugi składnik w równaniu (4.12)) [144]. W celu względnego oszacowania dokładności prowadzonych w programie HIFREQ obliczeń numerycznych, prowadzono analizy wartości poszczególnych składowych napięć występujących w równaniu (4.12) w zależności od przyjętego kroku ds . Poszczególne składowe napięcia otrzymywano wykorzystując (bezpośrednio lub po dokonaniu odpowiednich operacji matematycznych) obliczone w programie HIFREQ wartości składowych indukowanych napięć wzdłuż segmentów, potencjałów środków segmentów względem ziemi odniesienia oraz impedancji wewnętrznych i prądów płynących w tych segmentach. Do selekcji odpowiednich danych z plików wynikowych programu HIFREQ oraz przeprowadzenia na nich wymaganych operacji matematycznych użyto programów opracowanych w środowisku Matlab.

Wyniki przeprowadzonych analiz wskazują, że składowa indukowana napięcia może być obciążona znacznym błędem, związanym prawdopodobnie ze zbyt bliskim położeniem punktów obserwacji względem osi segmentów. Zaobserwowano również, że sposób podziału na segmenty elementów modelu może mieć istotny wpływ na wartości skalarnej różnicy potencjałów dla niektórych częstotliwości.

Uwzględniając wyniki tych analiz, w pracy nie brano pod uwagę składowych indukowanych napięć. Do dalszych obliczeń przyjęto sposób podziału na segmenty, w którym mak-

symalna ich długość w całym modelu jest dziesięciokrotnie mniejsza od najkrótszej długości fali oraz istnieją, jeśli to konieczne, pojedyncze odpowiednio krótkie segmenty w otoczeniu punktów, pomiędzy którymi analizowano wartości spadków napięć. Całkowity spadek napięcia pomiędzy dwoma punktami modelu stacji będzie w dalszej części pracy rozumiany, zgodnie z definicją impedancji całkowitej przewodu [49], jako skalarna różnica potencjałów tych punktów względem odległej ziemi odniesienia.

6.2. Porównanie wyników pomiarów terenowych z wynikami obliczeń numerycznych

Seria pomiarowa 1 – generator/źródło prądu udarowego połączone do ogrodzenia

Porównanie rozplywów prądów udarowych uzyskanych z pierwszej serii pomiarów terenowych w stacji Karczmisko z odpowiadającymi tej serii wynikami obliczeń numerycznych dla modelu nr (1) z zastosowaniem idealnego i rzeczywistego źródła prądu, przedstawiono na rys. 6.4. Podano wartości szczytowe prądów, w procentach względem całkowitego prądu udarowego doprowadzanego do wierzchołka wieży.

Jak widać, wyniki obliczeń rozplywów prądów otrzymane z zastosowaniem źródła idealnego oraz rzeczywistego różnią się nieznacznie.

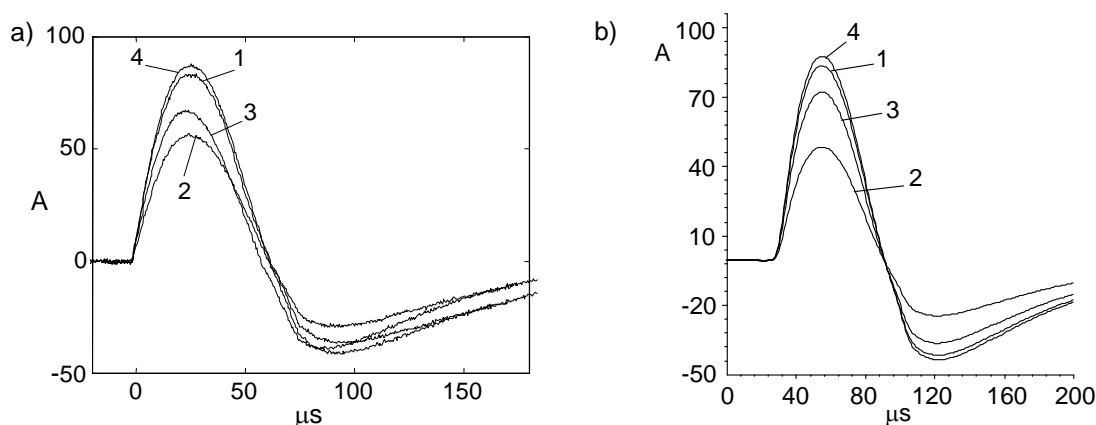
Spostrzeżenia wynikające z porównania wyników uzyskanych z pomiarów oraz z obliczeń zestawiono poniżej:

- Rozplywy prądów w głównych elementach łączących nadziemne oraz zakopane części konstrukcji i instalacji obiektu (przewody uziomowe słupów wsporczych wieży oraz szyn uziemiających) uzyskane z pomiarów oraz z obliczeń są zbliżone.
- Największe wartości prądów zaobserwowano w przewodach uziemiających słupów wsporczych wieży oraz w przewodzie uziomowym szyny technologicznej. W tych przewodach względne różnice wartości szczytowych prądów uzyskanych z obliczeń w stosunku do prądów uzyskanych z pomiarów nie przekraczają 24 % (największa różnica wystąpiła w przewodzie uziomowym szyny technologicznej).
- W przewodzie uziomowym szyny przepustów względna różnica wartości szczytowej prądu obliczonego w stosunku do prądu zmierzonego wyniosła aż 47 %.
- Otrzymane z obliczeń prądy odprowadzane do uziomu po stronie szyny technologicznej są mniejsze, a te odprowadzane po stronie szyny przepustów – większe w porównaniu z prądami uzyskanymi z pomiarów.
- Znacząco mniejsze wartości obliczonych prądów w stosunku do prądów uzyskanych z pomiarów zaobserwowano w:
 - przewodach wyrównawczych przy przepustach: połączenie wyrównawcze półki kablowej do szyny przepustów (odpowiednio 3 % i 9,4 %) oraz przewód wyrównawczy łączący szynę uziemiającą wieży z szyną przepustów (odpowiednio 3,9 % i 10 %);
 - przewodzie łączącym zacisk probierczy pod szyną przepustów ze zbrojeniem kontenera (prąd wpływający do zbrojenia): odpowiednio ok. 11,6 % oraz 22 %;
 - przewodzie uziemiającym urządzenie stacji bazowej: odpowiednio 3,5 % i 7,5 %;
 - przewodzie uziemiającym pierścienia wyrównawczego: odpowiednio 0,8 % i 1,7 %.
- Wartości prądów otrzymanych z obliczeń są generalnie mniejsze w porównaniu do prądów uzyskanych z pomiarów. Może to wynikać stąd, że błędy pomiarowe mogły powodować wzrost prądów (rozdział 5.3), natomiast błędy metod numerycznych ich zmniejszenie (suma prądów odprowadzanych do uziomu nieco mniejsza niż 100 % – rys. 6.4 b)).
- Różnice w wartościach szczytowych prądów uzyskanych z pomiarów oraz z obliczeń nie przekraczają ok. 8 % wartości szczytowej całkowitego prądu udarowego.

Wśród przypuszczalnych przyczyn rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów należy wymienić następujące:

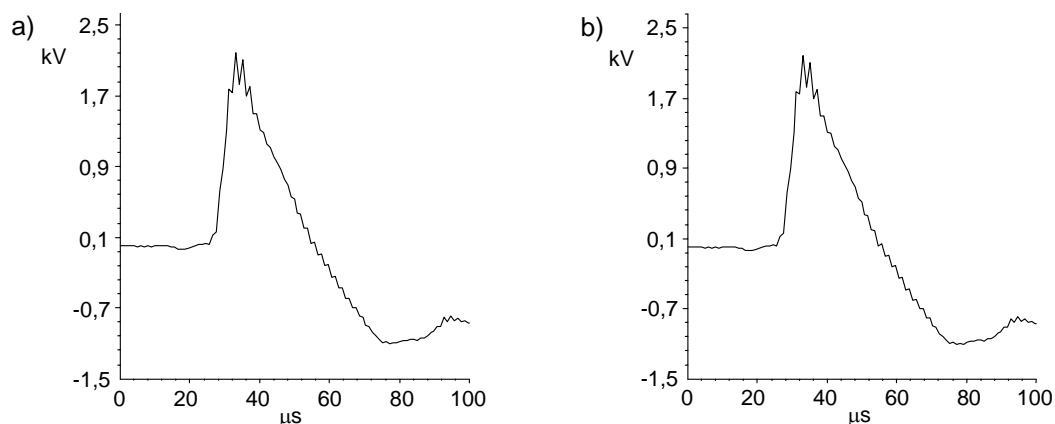
- brak lub nieuwzględnienie w modelu stacji szczegółowej informacji dotyczącej konstrukcji kontenera, konfiguracji okablowania w kontenerze oraz systemów zasilania;
- ewentualne niezgodności pomiędzy rzeczywistym usytuowaniem czy konfiguracją elementów uziomu a jego planami;
- błędy lub uproszczenia elementów modelu stacji oraz metody numerycznej.

Na rysunku 6.5 przedstawiono przebiegi prądów płynących w przewodach powrotnych, odprowadzających prąd udarowy z obiektu do generatora/źródła, zmierzone oraz uzyskane z obliczeń dla przypadku źródła idealnego. Jak widać, otrzymano dobrą zgodność kształtów i wartości szczytowych tych prądów. Kształty prądów uzyskanych z obliczeń w pozostałych miejscach, są również zbliżone do kształtów prądów rejestrowanych podczas badań terenowych. Wyjątek stanowią prądy płynące w przewodach uziemiających niektórych urządzeń w kontenerze, dla których w przypadku pomiarów zaobserwowano zniekształcenia w postaci nakładających się oscylacji o częstotliwości 50 – 60 kHz (rozdział 5).

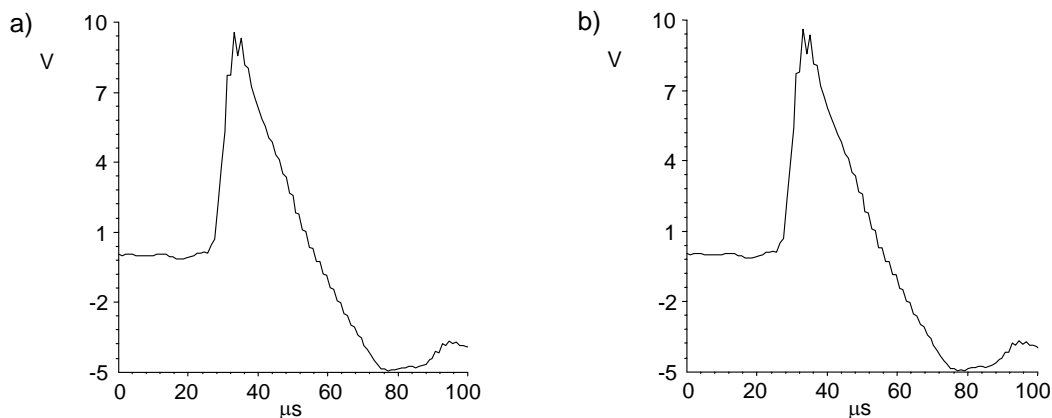


Rys. 6.5. Przebiegi prądów płynących w przewodach powrotnych otrzymane: a) z pomiarów; b) z obliczeń dla przypadku źródła idealnego

Przebiegi napięcia na zaciskach źródła prądu otrzymane z obliczeń z zastosowaniem źródła idealnego oraz rzeczywistego przedstawiono na rys. 6.6. Dodatkowo wyznaczono także spadek napięcia występujący pomiędzy szyną przepustów a szyną technologiczną dla obu przypadków (rys. 6.7). Jak widać, kształty oraz wartości szczytowe analizowanych spadków napięć, dla obu typów źródeł prądowych są do siebie bardzo zbliżone.



Rys. 6.6. Przebiegi napięcia na zaciskach źródła prądu otrzymane z obliczeń w przypadku zastosowania źródła: a) idealnego; b) rzeczywistego



Rys. 6.7. Przebiegi spadku napięcia pomiędzy szyną przepustów a szyną technologiczną otrzymane z obliczeń ze źródłem prądu: a) idealnym; b) rzeczywistym

Wartości szczytowe napięć uzyskanych na zaciskach źródeł prądu wynoszą po ok. 1,9 – 2 kV. Są to wartości nieco wyższe niż uzyskane na zaciskach generatora probierczego podczas badań terenowych (ok. 1,8 kV). Możliwe przyczyny tych rozbieżności to:

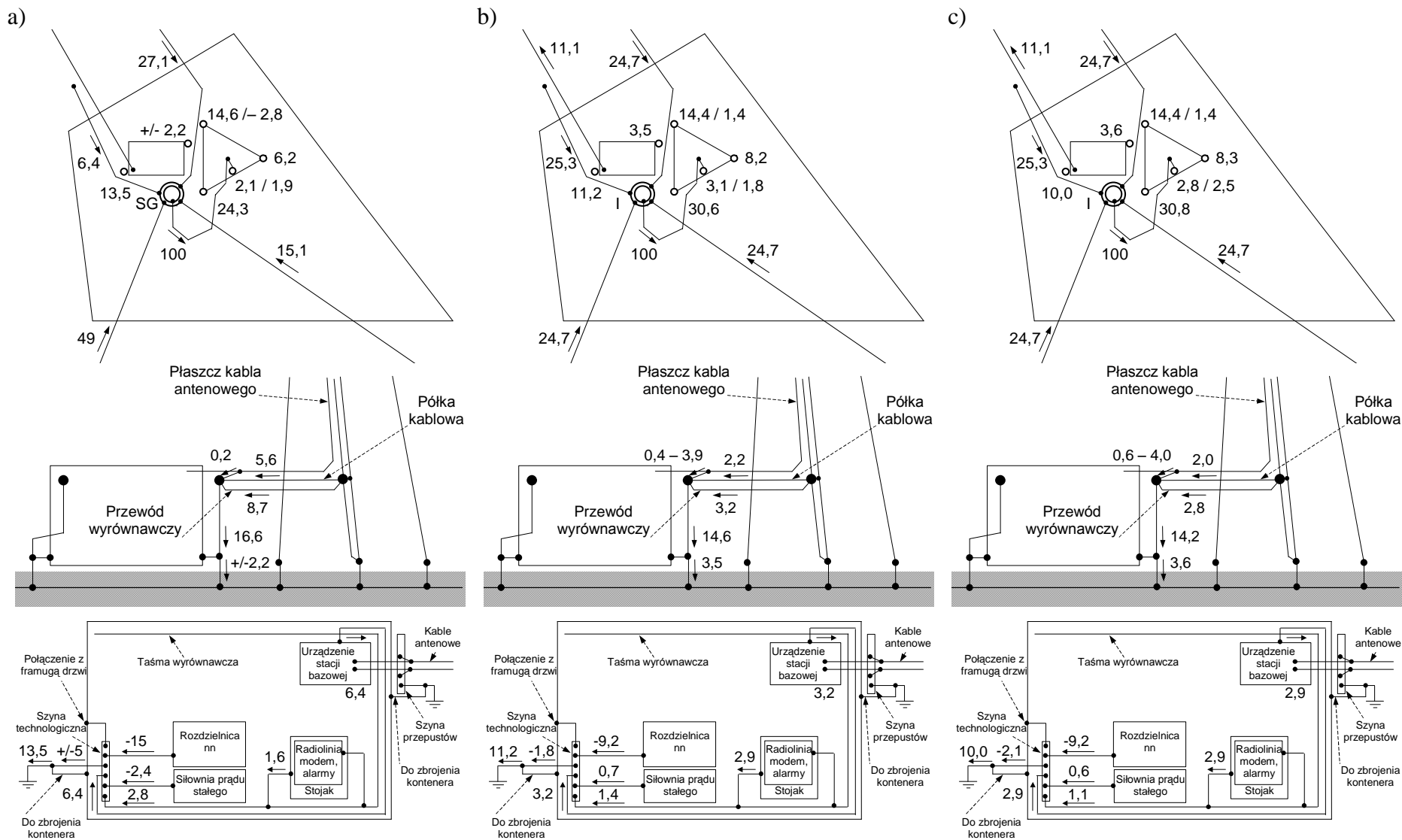
- nieuwzględnienie wszystkich elementów konstrukcji i instalacji w modelu numerycznym stacji (zbyt duża wartość impedancji pętli);
- uproszczenia elementów modelu stacji oraz błędy i/lub uproszczenia metody numerycznej (w szczególności związane ze sposobem podziału na segmenty elementów modelu);
- różnice w wartościach spadków napięć występujących w obwodach wewnętrznych rzeczywistego generatora probierczego oraz jego modelu.

Seria pomiarowa 2 – generator/źródło prądu udarowego łączone do elektrod pomocniczych

Rozpływy prądów udarowych otrzymane z drugiej serii pomiarowej w stacji Karczmisko oraz z odpowiadających tej serii obliczeń numerycznych dla przypadku modelu nr (1) stacji z zastosowaniem idealnego oraz rzeczywistego źródła prądu, przedstawiono na rys. 6.8. Wyniki podano w procentach wartości szczytowych prądów względem wartości szczytowej całkowitego prądu udarowego doprowadzonego do wieży.

W serii tej wystąpiły zauważalne różnice w rozpływach prądów otrzymanych z obliczeń w przypadku zastosowania źródła idealnego i rzeczywistego (rys. 6.8 b) i c)). Dotyczy to prądów w przewodach uziomowych drabinki kablowej i szyny uziemiającej wieży, w przewodach wyrównawczych przy przepustach oraz w przewodach uziemiających urządzenie stacji bazowej i pierścien wyrównawczy w kontenerze. Względne różnice wartości szczytowych prądów otrzymanych dla przypadku źródła idealnego w odniesieniu do prądów otrzymanych dla źródła rzeczywistego są jednak niewielkie, generalnie nie przekraczają 10 - 15%.

Różnice te mogą być wynikiem sprzężeń występujących pomiędzy obwodem źródła prądu reprezentującym obwody wewnętrzne generatora udarowego (wymiary ok. 20x20 cm), a pozostałymi elementami modelu stacji i obwodów doprowadzających/odprowadzających prąd. Wartości tych sprzężeń są większe w przypadku źródła rzeczywistego, ze względu na przepływ prądu w rezystancji wewnętrznej źródła (rys. 6.2). Prąd źródła rzeczywistego $i(t)$ charakteryzuje się większą wartością szczytową oraz większą stromością narastania czoła w porównaniu z prądem źródła idealnego, który jest równy wymaganemu prądowi obciążenia $i_0(t)$ ($i(t) = i_0(t)$). Podobnie, większe wartości sprzężeń oraz bardziej zauważalne ich efekty występują w przypadku serii pomiarowej 2, ponieważ seria ta charakteryzuje się większą wartością szczytową prądu źródła rzeczywistego $i(t)$ w porównaniu z serią 1 (odpowiednio ok. 3 kA oraz 1,1 kA) przy krótszym czasie narastania czoła tego prądu, a więc większą stromością narastania prądu na czole (odpowiednio ok. 1,3 kA/μs oraz 0,1 kA/μs).

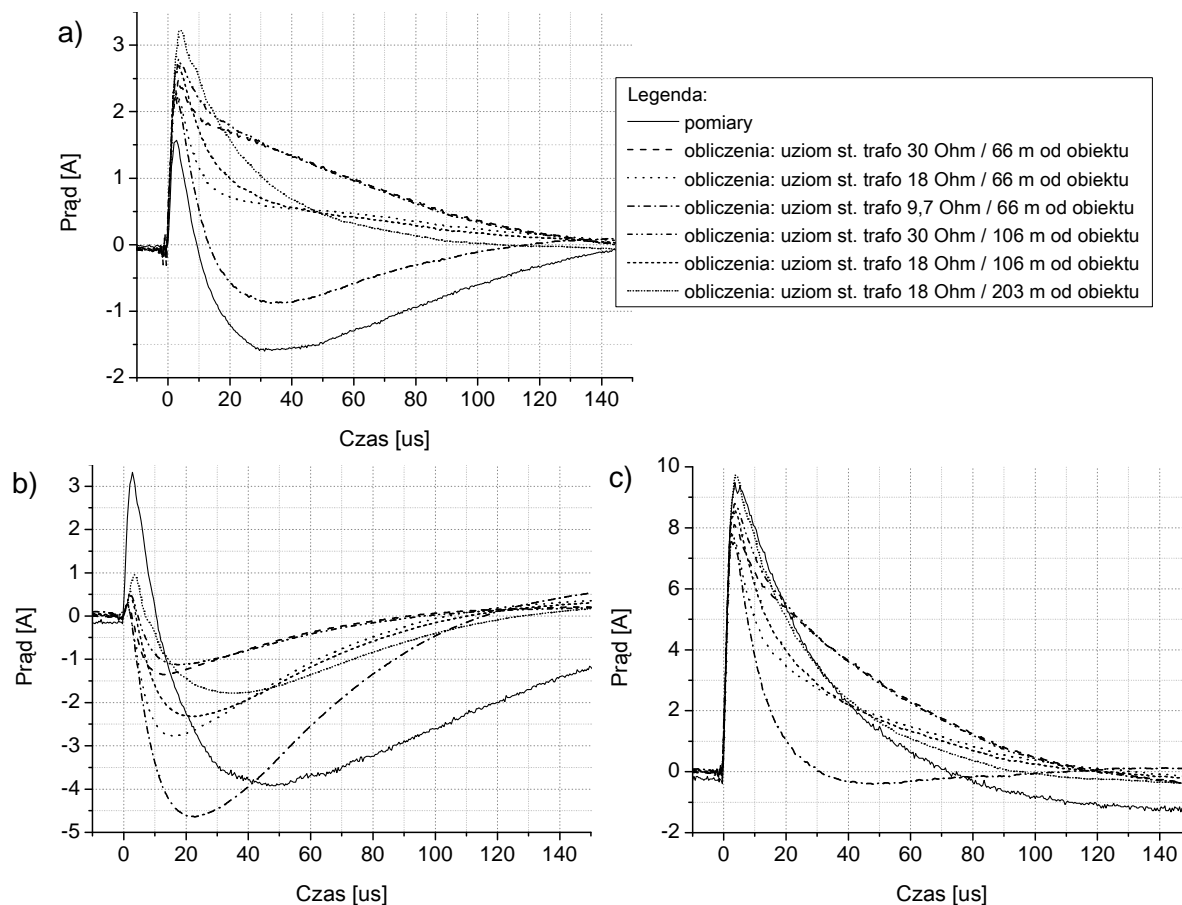


Rys. 6.8. Rozpływy prądów uderowych (w % względem całkowitego prądu uderowego) otrzymane: a) z pomiarów; b) z obliczeń dla modelu nr (1) przy zastosowaniu idealnego źródła prądu; c) z obliczeń dla modelu nr (1) przy zastosowaniu rzeczywistego źródła prądu

Otrzymane wyniki wskazują, że zastosowanie rzeczywistego źródła prądu, zamiast idealnego, nie wprowadza zasadniczych zmian w rozptywach prądów w stacji, a w szczególności nie przybliża ich do wyników uzyskanych z pomiarów. Przemawia to za możliwością wykorzystania źródła idealnego, jako prostszego w zastosowaniu do modelowania i prowadzenia obliczeń numerycznych.

Należy zaznaczyć, że nie dysponowano szczegółowymi informacjami dotyczącymi rzeczywistej konfiguracji ani impedancji uziomu stacji transformatorowej zasilającej stację bazową. W obliczeniach numerycznych dla modelu nr (1) przyjęto, że uziom stacji transformatorowej ma postać otoku z czterema pionowymi elektrodami w narożach (rys. 6.1). Dla takiego układu otrzymano stosunkowo wysoką wartość impedancji uziomu, wynoszącą ok. 30Ω przy częstotliwości 50 Hz. Przyjęta konfiguracja uziomu stacji transformatorowej mogła mieć istotny wpływ na wyniki obliczeń numerycznych rozptywu prądów w stacji bazowej i stanowić jedną z możliwych przyczyn rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarów i obliczeń. Dodatkowo, na wyniki obliczeń mogły mieć wpływ także lokalne zmiany rezystywności gruntu, których nie uwzględniono w modelach numerycznych z uwagi na ograniczenia programowe.

W związku z powyższym przeprowadzono obliczenia dla kilku różnych wariantów modelu nr (1) stacji bazowej, różniących się konfiguracją uziomu stacji transformatorowej oraz jego odległością od stacji bazowej. Otrzymane wyniki miały określić wpływ wymienionych czynników na kształty i wartości szczytowe rozptywających się prądów udarowych. Na rys. 6.9 zobrazowano wpływ impedancji uziomu stacji transformatorowej (uzyskanej przy różnych konfiguracjach jej uziomu) oraz odległości stacji transformatorowej od stacji bazowej na przebiegi prądów w wybranych elementach instalacji stacji bazowej [70].

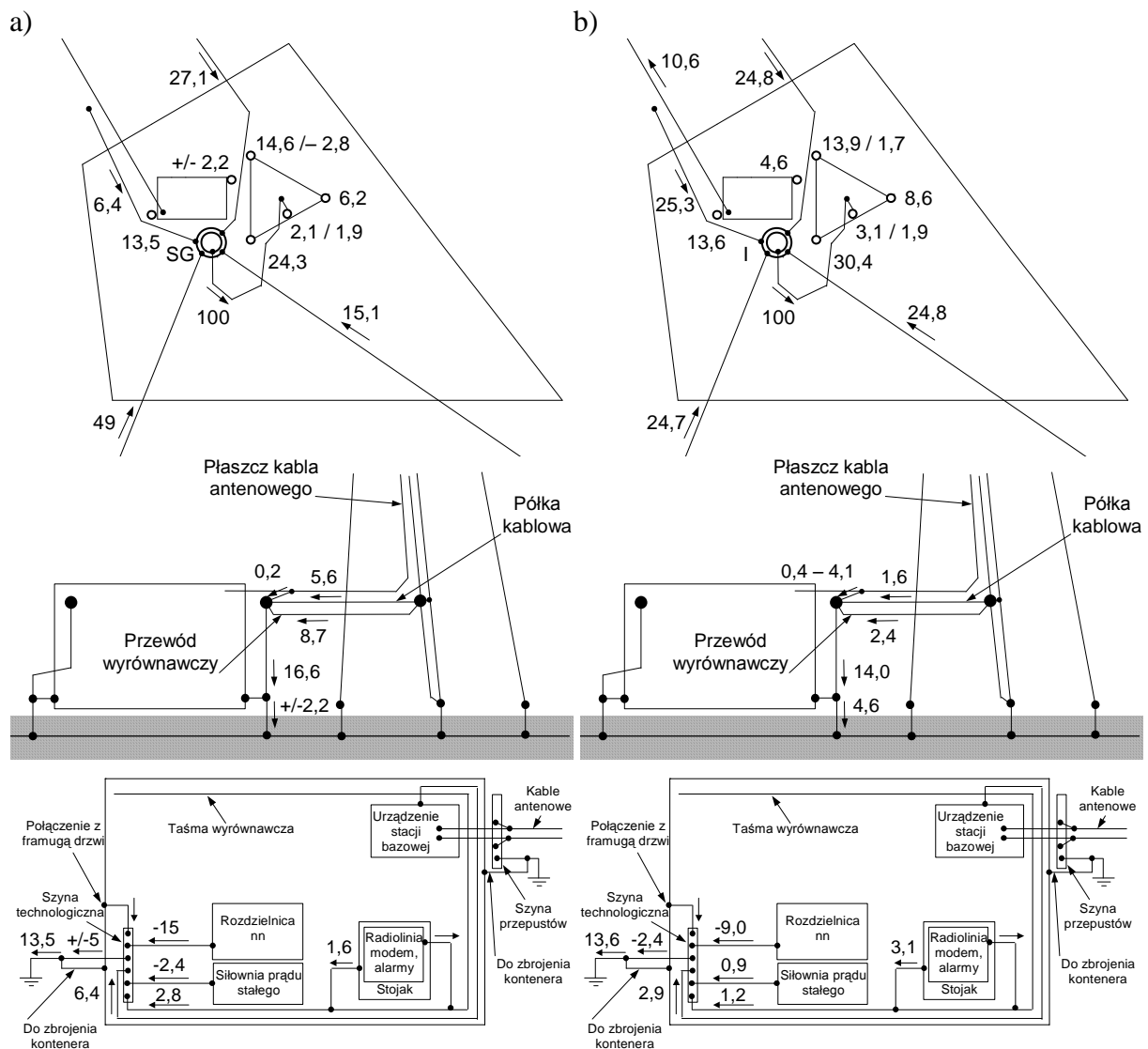


Rys. 6.9. Przebiegi prądów płynących w przewodach: a) uziomowym szyny przepustów; b) uziemającym szyny technologicznej; c) uziomowym szyny technologicznej; dla różnych impedancji oraz różnych odległości uziomu stacji transformatorowej

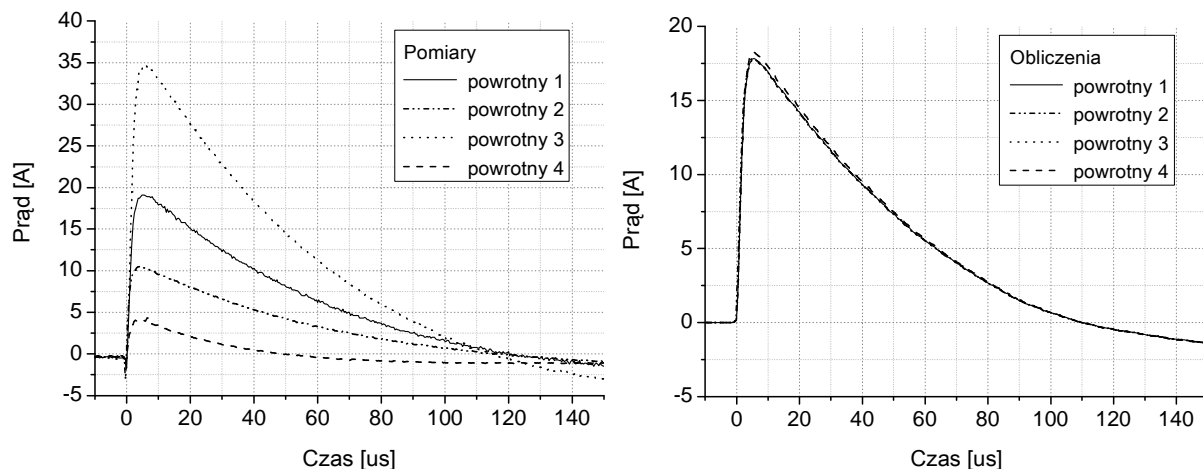
Najbardziej zbliżone, pod względem kształtów, do prądów otrzymanych z pomiarów są przebiegi prądów wyznaczone dla przypadku, w którym uziom stacji transformatorowej znajdował się w odległości ok. 200 m od stacji bazowej i składał się z otoku, czterech uziomów pionowych oraz czterech uziomów promieniowych o długości 5 m umieszczonych w narożach otoku (impedancja przy częstotliwości 50 Hz równa 18Ω). Ten wariant modelu nr (1) oznaczany będzie w skrócie jako model nr (1)/ $18 \Omega/203$ m.

Porównanie rozplądów prądów udarowych uzyskanych z pomiarów oraz z obliczeń numerycznych dla tego przypadku przy zastosowaniu idealnego źródła prądu, przedstawiono na rys. 6.10, natomiast pozostałe przebiegi prądów udarowych, na rys. 6.11 – 6.15.

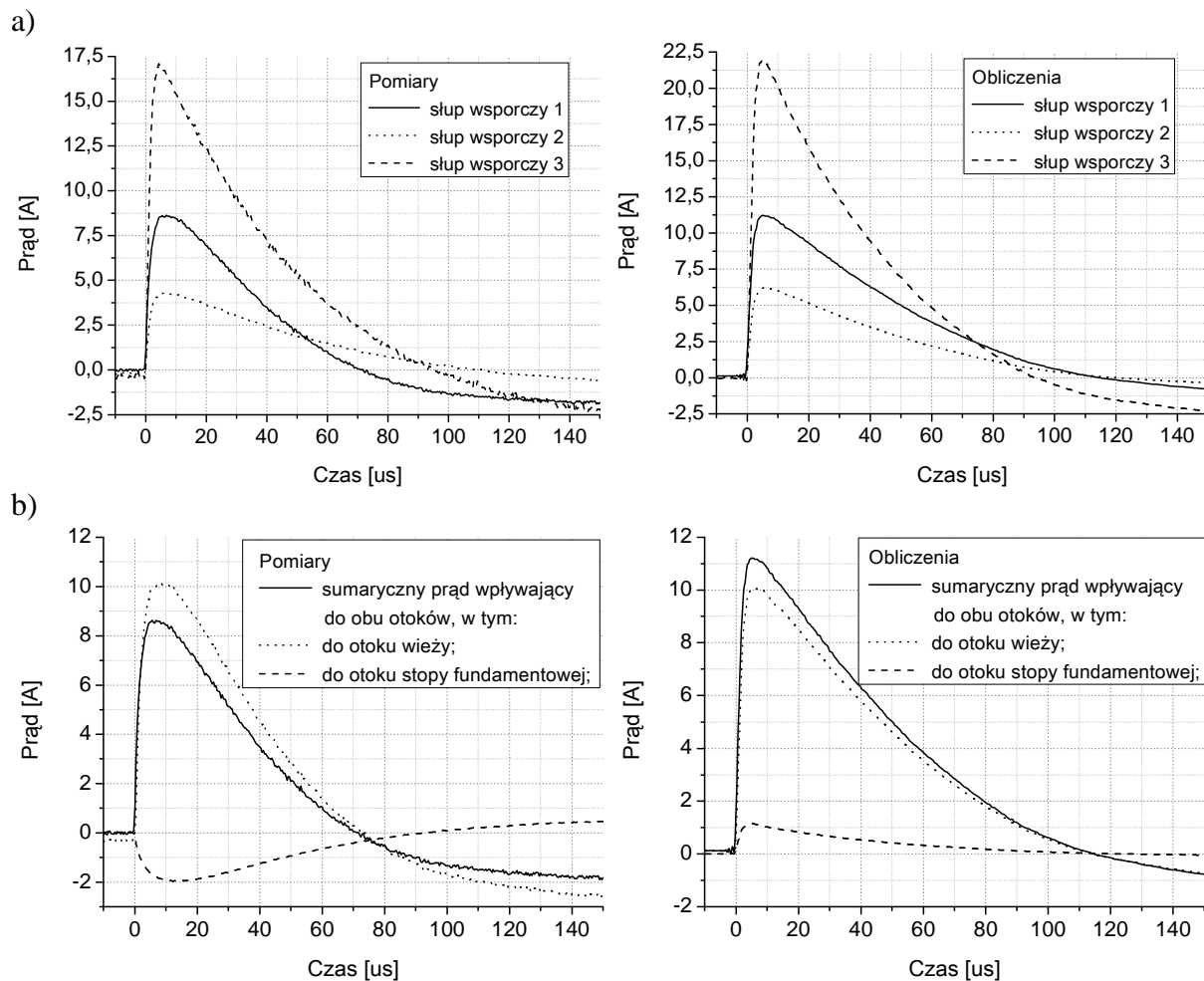
Z porównania rozplądów prądów udarowych (rys. 6.8 a) i b) i 6.10) oraz przebiegów tych prądów wynika, że właściwości systemu uziomowego stacji transformatorowej oraz jej odległość od stacji bazowej w analizowanym zakresie zmian mają ograniczony wpływ na podział prądów. Wartości szczytowe prądów otrzymanych z obliczeń w stosunku do prądów uzyskanych z pomiarów dla modelu nr (1) oraz dla modelu nr (1)/ $18 \Omega/203$ m, wykazują podobne rozbieżności, ze wskazaniem na model nr (1) jako jednak nieznacznie bliższy pomiarom w większości analizowanych punktów pomiarowych.



Rys. 6.10. Rozpląd prądów udarowych (w % względem całkowitego prądu udarowego) otrzymane: a) z pomiarów; b) z obliczeń dla modelu nr (1)/ $18 \Omega/203$ m



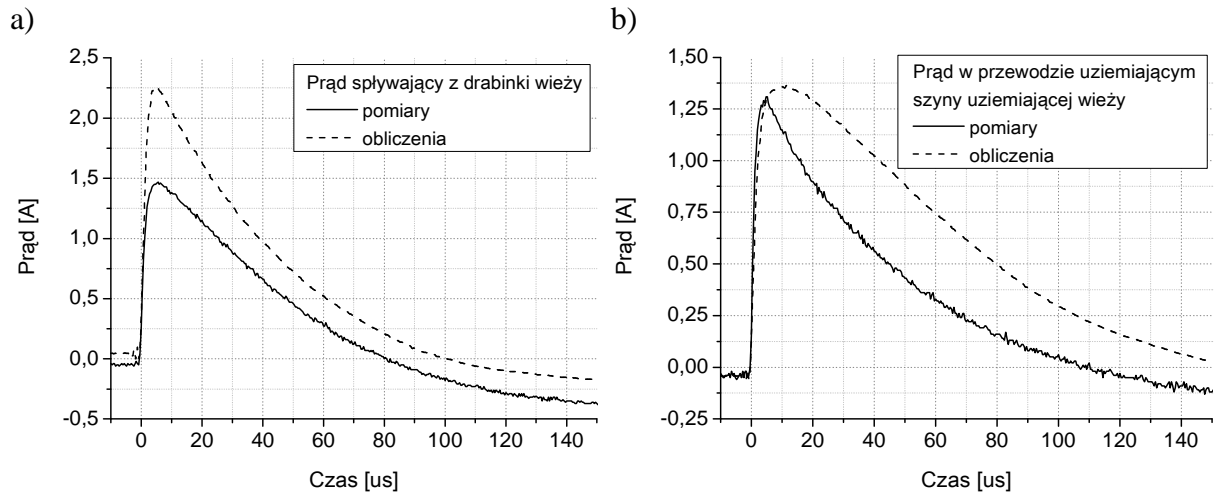
Rys. 6.11. Przebiegi prądów płynących w poszczególnych przewodach powrotnych uzyskane z pomiarów oraz z obliczeń



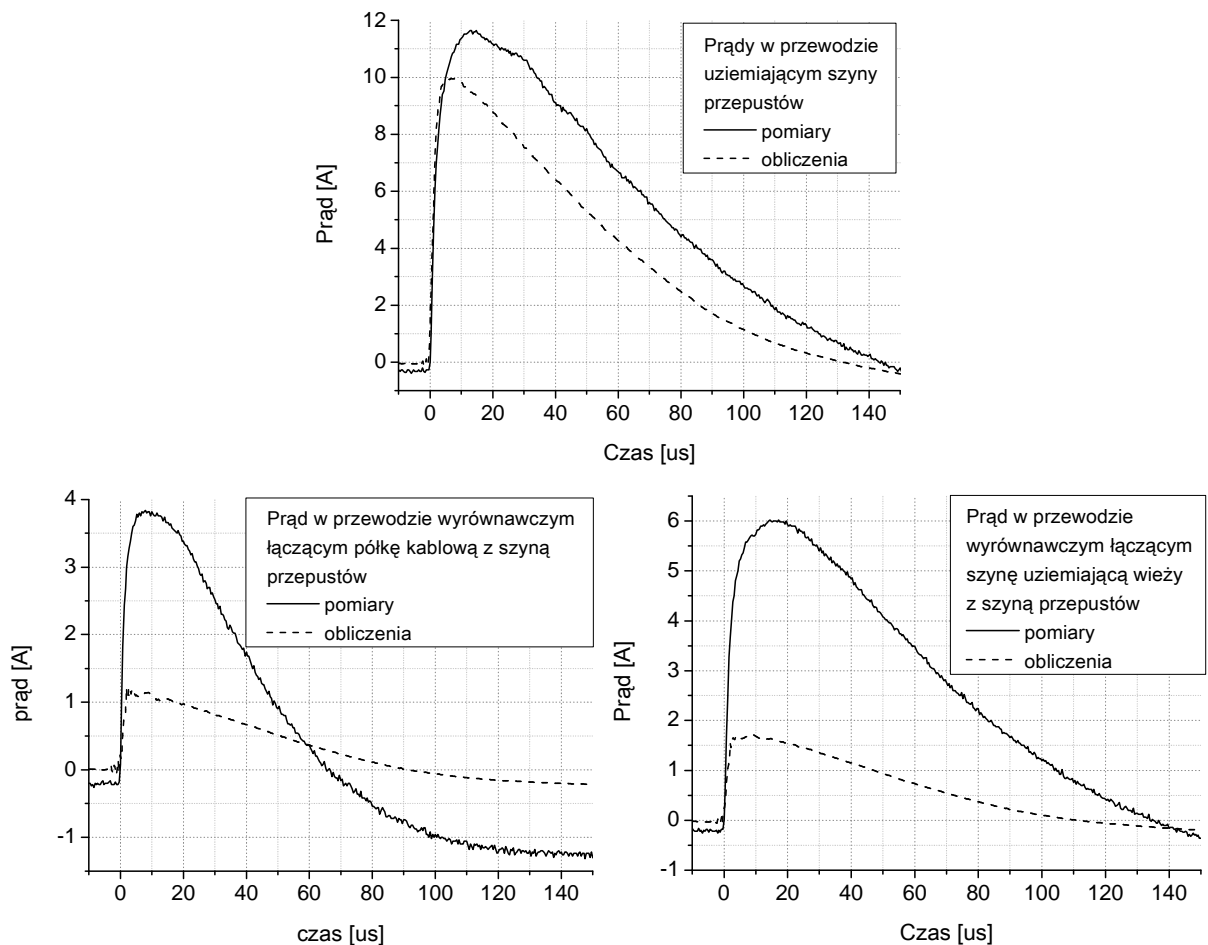
Rys. 6.12. Przebiegi prądów płynących w przewodach uziemiających poszczególnych słupów wsporczych wieży (a) oraz w przewodach uziomowych i uziemiającym słupa wsporcze 1 (b) uzyskane z pomiarów oraz z obliczeń

Kształty prądów uzyskanych z pomiarów oraz z obliczeń dla modelu nr (1)/18 Ω /203 m są w większości przypadków zbliżone. Dotyczy to szczególnie sumarycznych prądów wpływających do uziomu ze słupów wsporczych i drabinki wieży oraz prądów płynących w prze-

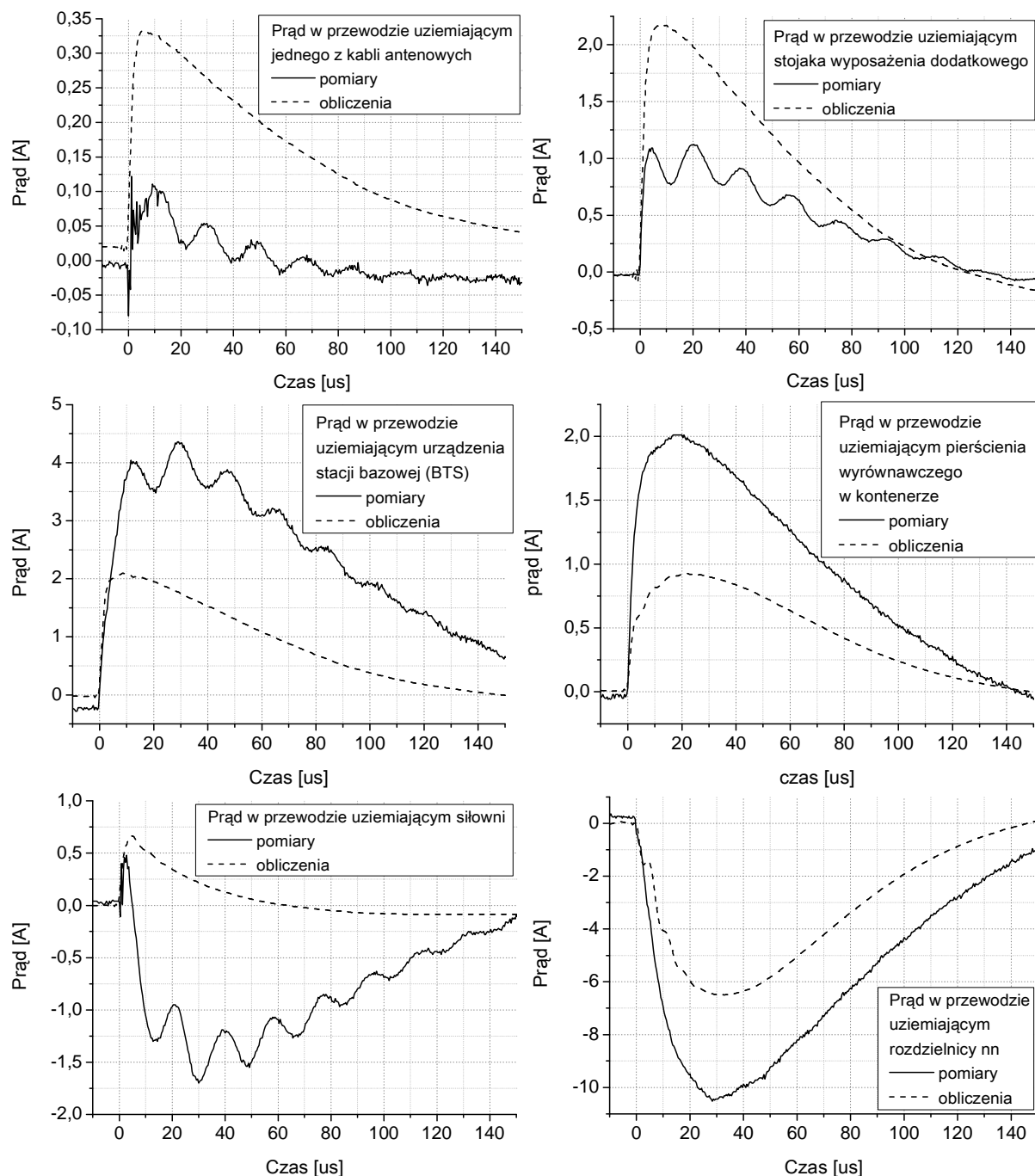
wodach uziemiających praktycznie wszystkich urządzeń w kontenerze za wyjątkiem siłowni (nie biorąc pod uwagę oscylacji obecnych w przebiegach prądów zmierzonych). Różnice w kształtach prądów obliczonych i zmierzonych ujawniają się natomiast w przypadku prądów płynących w przewodach wyrównawczych i uziemiających przy przepustach. Przyczyną tych różnic mogą być uproszczenia w modelowaniu konstrukcji wsporczych kabli antenowych.



Rys. 6.13. Porównanie przebiegów prądów w przewodach uziemiających drabinki kablowej (a) oraz szyny uziemiającej wieży (b) uzyskanych z pomiarów oraz z obliczeń



Rys. 6.14. Przebiegi prądów płynących w przewodach uziemiających i wyrównawczych przy przepustach uzyskane z pomiarów oraz z obliczeń



Rys. 6.15. Przebiegi prądów płynących w przewodach uziemiających jednego z kabli antenowych przy przepustach oraz urządzeń i instalacji w kontenerze uzyskane z pomiarów oraz z obliczeń

Poniżej przedstawiono dodatkowe spostrzeżenia wynikające z analizy kształtów i wartości szczytowych prądów uzyskanych z pomiarów i obliczeń:

- Najlepszą zgodność kształtów i wartości szczytowych prądów uzyskanych z pomiarów oraz z obliczeń uzyskano w przypadku prądów płynących w przewodach uziomowych słupów wsporczych wieży oraz szyny technologicznej. Względne różnice wartości szczytowych prądów uzyskanych z obliczeń w stosunku do prądów uzyskanych z pomiarów nie przekraczają 34 % (przewód uziemiający słupa wsporczego 1).
- Większymi względnymi różnicami wartości szczytowych prądów otrzymanych z obliczeń w stosunku do prądów mierzonych charakteryzowały się prądy płynące w:

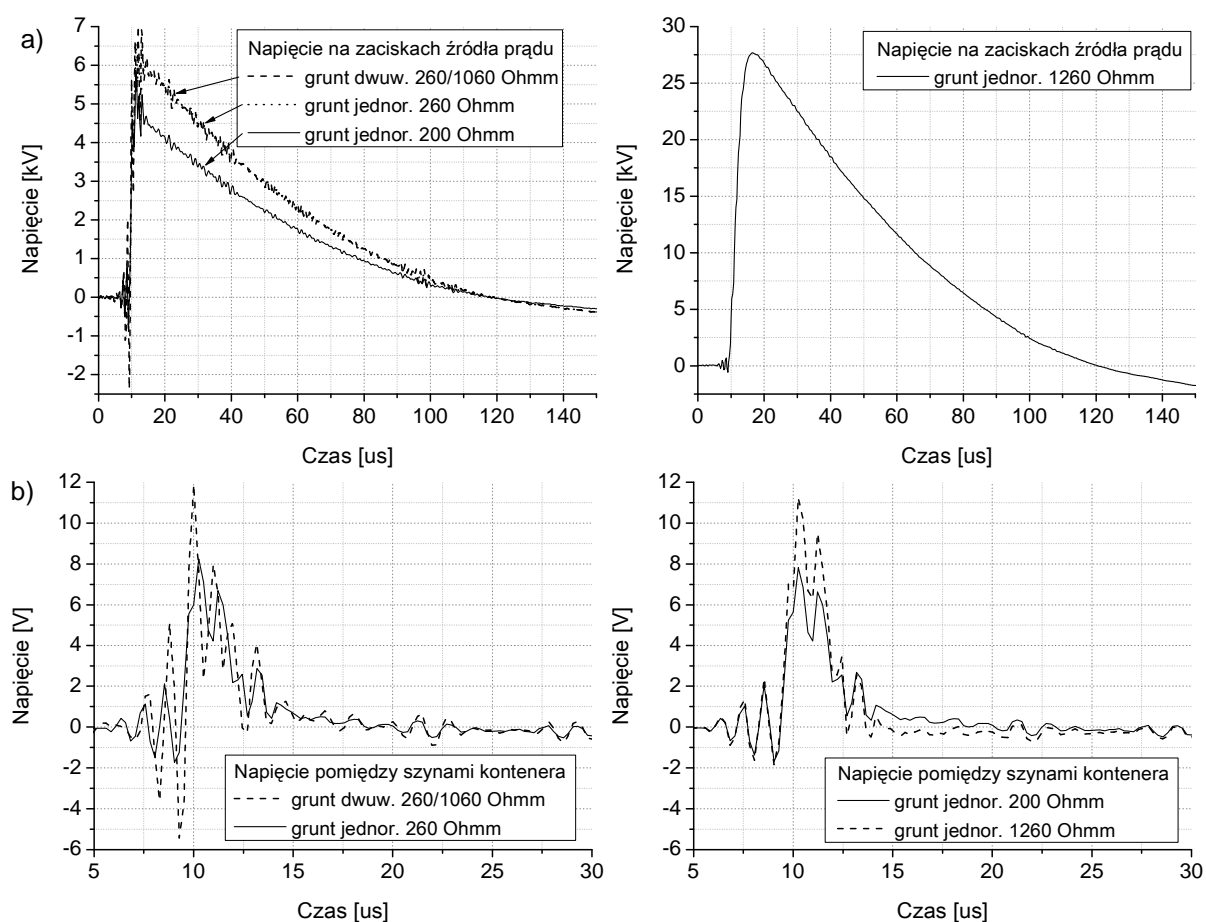
- przewodzie uziomowym szyny przepustów, ok. 59 %;
- przewodzie uziemiającym drabinki kablowej wieży, ok. 48 %.
- Podobnie, jak w pierwszej serii, znacznie mniejsze wartości prądów otrzymanych z obliczeń numerycznych w stosunku do prądów uzyskanych z pomiarów zaobserwowano w:
 - przewodzie wyrównawczym łączącym półkę kablową z szyną przepustów (odpowiednio 2,2 % i 5,6 %);
 - przewodzie wyrównawczym łączącym szynę uziemiającą wieży z szyną przepustów (odpowiednio 3,2 % i 8,7 %);
 - przewodzie uziemiającym urządzenia stacji bazowej (3,2 % i 6,4 %);
 - przewodzie uziemiającym pierścienia wyrównawczego (1,4 % i 2,8 %).
- Prąd o mniejszej wartości otrzymany z obliczeń w porównaniu do uzyskanego z pomiarów zaobserwowano także w przewodzie uziemiającym rozdzielnicę nn (9,2 % i 15 %).
- Prądy o większych wartościach otrzymane z obliczeń w porównaniu do uzyskanych z pomiarów zaobserwowano w przewodach uziemiających kabli antenowych: odpowiednio 0,4 – 3,9 % oraz 0,2 % (podobną prawidłowość obserwowano także w serii 1).
- Odmienne dla obliczeń i pomiarów kierunki prądów płynących w przewodzie uziemiającym siłowni na tle wcześniejszych podsumowań rozptyłów prądów w kontenerze, mogą wskazywać na rolę dokładności odwzorowania szczegółów konfiguracji okablowania i systemów zasilania w modelu stacji.
- Odmienne w przypadku obliczeń i pomiarów kierunki prądów płynących w przewodach uziomowych łączących słupy wsporcze wieży z uziomami otokowymi wokół fundamentów, mogą wskazywać na rolę dokładności odwzorowania rzeczywistych struktur gruntów i/lub elementów zbrojenia fundamentów wieży w modelu numerycznym.
- W wyniku obliczeń numerycznych otrzymano równomierny podział prądów pomiędzy przewody powrotne, w przeciwieństwie do wyników pomiarów. Główną przyczyną są prawdopodobnie różnice impedancji kontaktu poszczególnych elektrod pomocniczych z ziemią podczas badań terenowych.
- Dodatkowe obliczenia przeprowadzone dla prostego modelu stacji pobudzanego pojedynczą harmoniczną 7 kHz wskazują, że wpływ podziału prądów pomiędzy przewody powrotne na rozptył prądów w samej stacji jest pomijalny.
- Podobnie jak w serii pomiarowej 1, względne różnice w wartościach szczytowych prądów otrzymanych z pomiarów oraz z obliczeń nie przekraczają ok. 8 % wartości szczytowej całkowitego prądu udarowego doprowadzanego do wierzchołka wieży.

Jako główne przyczyny rozbieżności obliczeń i pomiarów należy wymienić:

- uproszczenia modelu gruntu i/lub niedokładność oszacowania wartości rezystywności;
- indywidualne różnice w impedancji kontaktu poszczególnych elementów uziomu z gruntem i/lub specyficzne właściwości elektryczne fundamentów wieży, których nie uwzględniono w modelach numerycznych;
- uproszczenia w modelowaniu poszczególnych elementów konstrukcji i instalacji oraz brak lub nieuwzględnienie dokładnych konfiguracji wszystkich instalacji metalowych w modelu stacji, w szczególności uziomów, elementów zbrojenia fundamentów wieży, półek kablowych oraz konstrukcji i instalacji okablowania kontenera (seria pomiarowa 1);
- błędy i uproszczenia metody numerycznej.

Otrzymywane z obliczeń dla wszystkich wariantów modelu nr (1) wartości szczytowe napięcia na zaciskach źródła prądu są wyższe niż napięcie ładowania generatora probierczego podczas badań terenowych (5 kV), i wynoszą po ok. 6 kV. Częściowo może to być wynikiem tych samych czynników, co w przypadku serii pomiarowej 1, jednak dużo większa rozbieżność otrzymana w serii 2 wskazuje na istnienie dodatkowych przyczyn. Analizy numeryczne wykazały, że modyfikacje drogi powrotnej prądu w ziemi (wymuszone zmianami usytuowa-

nia elektrod pomocniczych), a także zmiany konfiguracji i usytuowania uziomu stacji transformatorowej oraz wartość rezystywności dolnej warstwy gruntu, nie wpływają znacząco na przebieg napięcia na zaciskach źródła prądu. Dopiero niewielkie zmniejszenie rezystywności górnej warstwy gruntu z 260 Ωm do 200 Ωm lub zastosowanie jednorodnego modelu gruntu o rezystywności 200 Ωm , spowodowało obniżenie napięcia na zaciskach źródła prądu do wartości zbliżonej do zarejestrowanej podczas badań terenowych (ok. 4,7 kV). Wpływ rezystywności oraz struktury gruntu na przebieg napięcia na zaciskach źródła prądu przedstawiono na rys 6.16 a). Otrzymane wyniki mogą świadczyć o występowaniu istotnych lokalnych zmian rezystywności rzeczywistego gruntu, które nie zostały prawidłowo odzwierciedlone przy pomiarach rezystancji (względny techniczny) i/lub uwzględnione w przyjętym modelu gruntu (określona dokładność przybliżenia rzeczywistej struktury gruntu modelem warstwowym).



Rys. 6.16. Przebiegi napięć na zaciskach źródła prądu (a) oraz pomiędzy szyną przepustową a szyną technologiczną (b) dla różnych rezystywności i struktur gruntu

Na rysunku 6.16 b) przedstawiono dodatkowo wpływ rezystywności oraz struktury modelu gruntu na przebieg napięcia pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera. Warto zauważyć, że w analizowanym zakresie zmian, przebiegi napięcia pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera zmieniają się w znacznie mniejszym stopniu ze wzrostem rezystywności gruntu niż przebiegi napięcia na zaciskach źródła prądu (napięcie odkłada się głównie w ziemi).

Oscylacje, występujące przed oraz na czole impulsów napięć (rys. 6.16) mogą wynikać częściowo ze zbyt małej liczby częstotliwości, dla których w operacji odwrotnego przekształcenia Fourier'a uwzględniono wyniki obliczeń otrzymanych w programie HIFREQ (rozdział 4), a częściowo z szumów obecnych w zarejestrowanym przebiegu prądu udarowego, który użyto jako sygnał wymuszający w obliczeniach numerycznych.

Rozpływy prądów w stacji dla analizowanych przypadków gruntów były do siebie zbliżone. Wyraźne różnice obserwowano jedynie dla gruntów o najniższych (ok. 200 Ωm) i najwyższych (ok. 1300 Ωm) wartościach rezystywności. Zarówno wartości szczytowe jak i kształty prądów dla przypadku modelu gruntu jednorodnego o rezystywności 200 Ωm nie uległy zasadniczym zmianom w stosunku do analizowanego wcześniej przypadku gruntu dwuwarstwowego 260/1060 Ωm .

6.3. Porównanie rozpływów prądów w modelach rozbudowanym oraz podstawowym

Uwzględniając przedstawione analizy porównawcze wyników pomiarów terenowych i obliczeń numerycznych oraz dążąc do skrócenia czasu obliczeń, wprowadzono do modelu rozbudowanego stacji (model nr (1) – rozdział 6.1) następujące uproszczenia:

- drabinkę kablową wzdłuż wieży zastąpiono pojedynczym przewodem łączonym co ok. 1 m do konstrukcji wieży;
- konstrukcję wsporczą kabli antenowych (półkę kablową) na trasie pomiędzy wieżą a kontenerem zastąpiono pojedynczym przewodem;
- pominięto półkę kablową w kontenerze.

Otrzymany model stacji będzie w dalszej części pracy nazywany **modelem podstawowym** lub **modelem nr (2)**.

Wyniki obliczeń rozpływów prądów udarowych w stacji dla modeli nr (1) oraz nr (2), przy założeniu, że prąd udarowy odprowadzany jest z obiektu do źródła za pośrednictwem ziemi (elektrody pomocnicze) przedstawiono na rys. 6.17.

Dla modelu nr (2) obserwuje się wyraźne zmiany w podziale prądów płynących w tych elementach konstrukcji, które uległy uproszczeniu w stosunku modelu nr (1) oraz w sąsiedztwie tych elementów. Są to prądy płynące w:

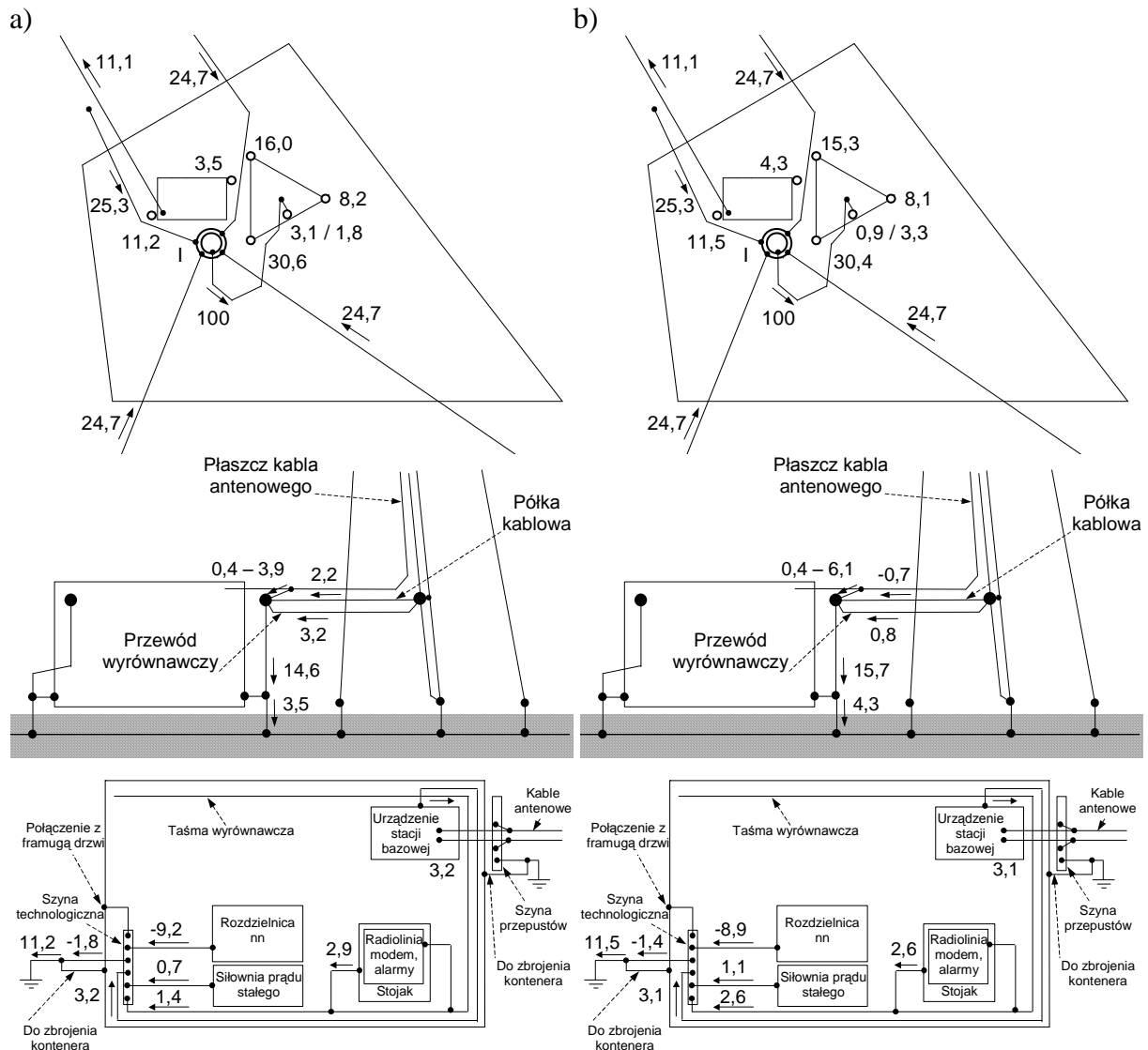
- przewodach uziemiających drabinki kablowej i szyny uziemiającej wieży;
- przewodzie uziomowym szyny przepustów;
- przewodach wyrównawczych przy przepustach;
- przewodach uziemiających kabli antenowych;
- przewodzie uziemiającym pierścienia wyrównawczego w kontenerze (w modelu nr (1) półka kablowa w kontenerze połączona była z pierścieniem wyrównawczym).

W szczególności, zmniejszyły się znacznie (a nawet zmieniły polaryzację) prądy płynące w przewodach wyrównawczych łączących szynę uziemiającą wieży oraz półkę kablową z szyną przepustów (odpowiednio z 3,2 % na 0,8 % oraz z 2,2 % na -0,7 %). Równocześnie prądy o większych wartościach popłynęły w przewodach uziemiających niektórych kabli antenowych.

Praktycznie nie uległy natomiast zmianom wartości:

- prądów odpływających do uziomu ze słupów wsporczych wieży;
- prądów płynących w przewodach uziemiających urządzenia stacji bazowej, stojaka wyposażenia dodatkowego i rozdzielnicy nn oraz w przewodach uziomowym szyny technologicznej i ochronno-neutralnym przyłącza zasilania ze stacji transformatorowej;
- prądu wpływającego do zbrojenia kontenera z zacisku probierczego pod szyną przepustów (z ok. 11,1 % na 11,4 %);
- spadku napięcia pomiędzy szyną technologiczną a szyną przepustów.

Uwzględniając powyższe spostrzeżenia oraz fakt skrócenia czasu obliczeń, można uznać model podstawowy za wystarczający do właściwego oszacowania wartości spadków napięć powstających w kontenerze oraz najważniejszych prądów rozptywających się w stacji i wpływających do zewnętrznej instalacji zasilającej.



Rys. 6.17. Rozpływy prądów udarowych (w % względem wartości szczytowej prądu udarowego wpływającego do wieży) dla modelu stacji: a) nr (1); b) nr (2)

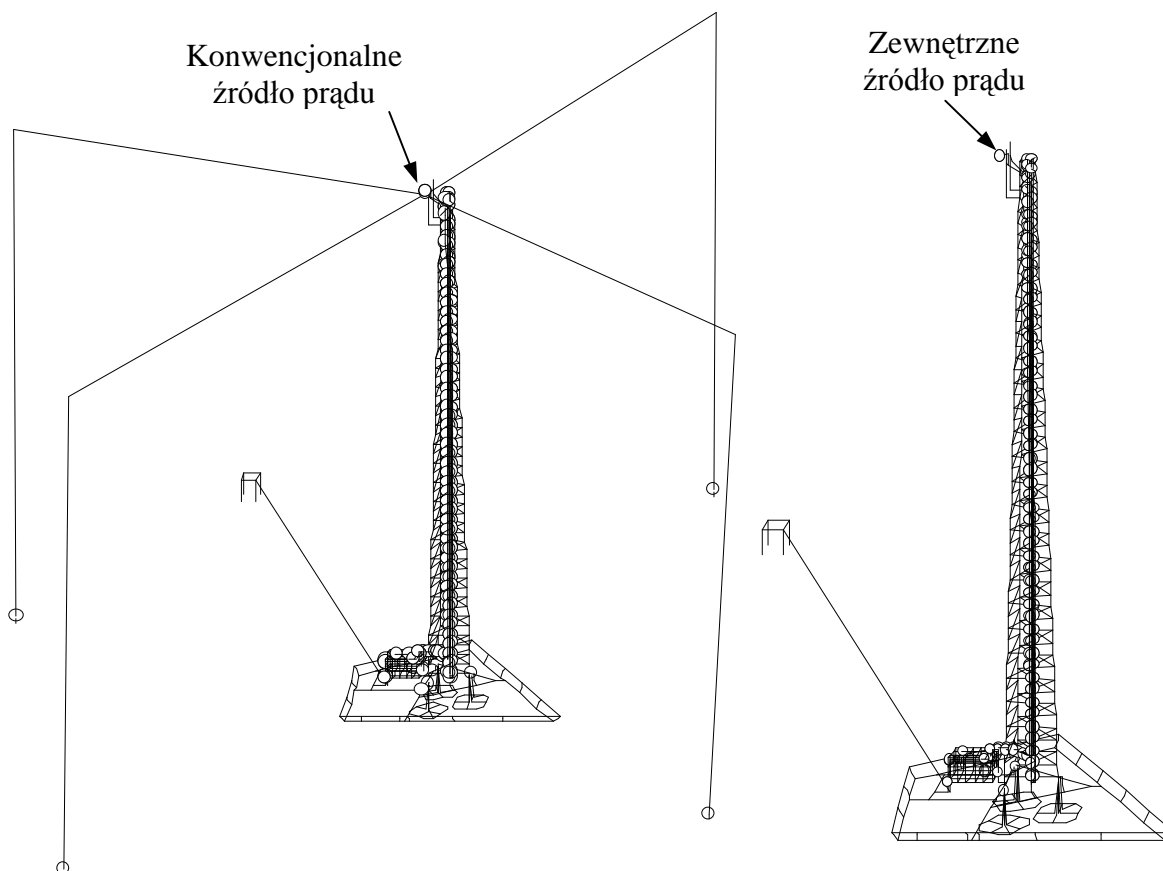
Dla oceny poziomów wytworzonych napięć najbardziej istotne jest właściwe odwzorowanie rozplywu prądów w przewodach uziemiających urządzenia stacji bazowej i rozdzielnic nn (lub w przyłączy zasilania ze stacji transformatorowej), w przewodzie uziomowym szyny technologicznej oraz w przewodzie wyrównawczym łączącym zbrojenie kontenera do zacisku probierczego pod szyną przepustów. Ponieważ prądy w tych przewodach otrzymane w wyniku obliczeń numerycznych (dla obu modeli stacji) są niższe od uzyskanych z pomiarów o ok. 17 – 50 % (zależnie od miejsca), rzeczywiste wartości spadków napięć w kontenerze mogą się różnić od obliczonych maksymalnie w tej samej proporcji.

6.4. Obliczenia dla źródeł prądu umieszczanych na szczycie wieży

Jak wspomniano w rozdziale 5, jedną z wad zastosowanej metody pomiarowej jest zależność rozplywu prądów udarowych od rozmieszczenia przewodów doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy do/z obiektu badanego. Podczas rzeczywistego wyładowania piorunowego sposób doprowadzenia prądu do wieży jest zupełnie inny niż występujący podczas badań terenowych, inny będzie również rozplyw prądów w obiekcie.

W celu zbadania wpływu przewodów powrotnych na podział prądu udarowego w stacji, przeprowadzono dodatkowe symulacje numeryczne dla modelu nr (1) przy założeniu, że źródło prądu udarowego (generator probierczy) umieszczone zostało na szczycie wieży. Przeanalizowano dwa przypadki:

- konwencjonalne idealne źródło prądu – prąd wprowadzany do wieży powracał do źródła czterema przewodami oddalonych od obiektu, połączonymi z czterema pomocniczymi elektrodami umieszczonymi w ziemi (rys. 6.18 a));
- zewnętrzne źródło prądu – prąd wprowadzany do wieży nie wymaga zamknięcia obwodu powrotnego (rys. 6.18 b)) [140, 141].



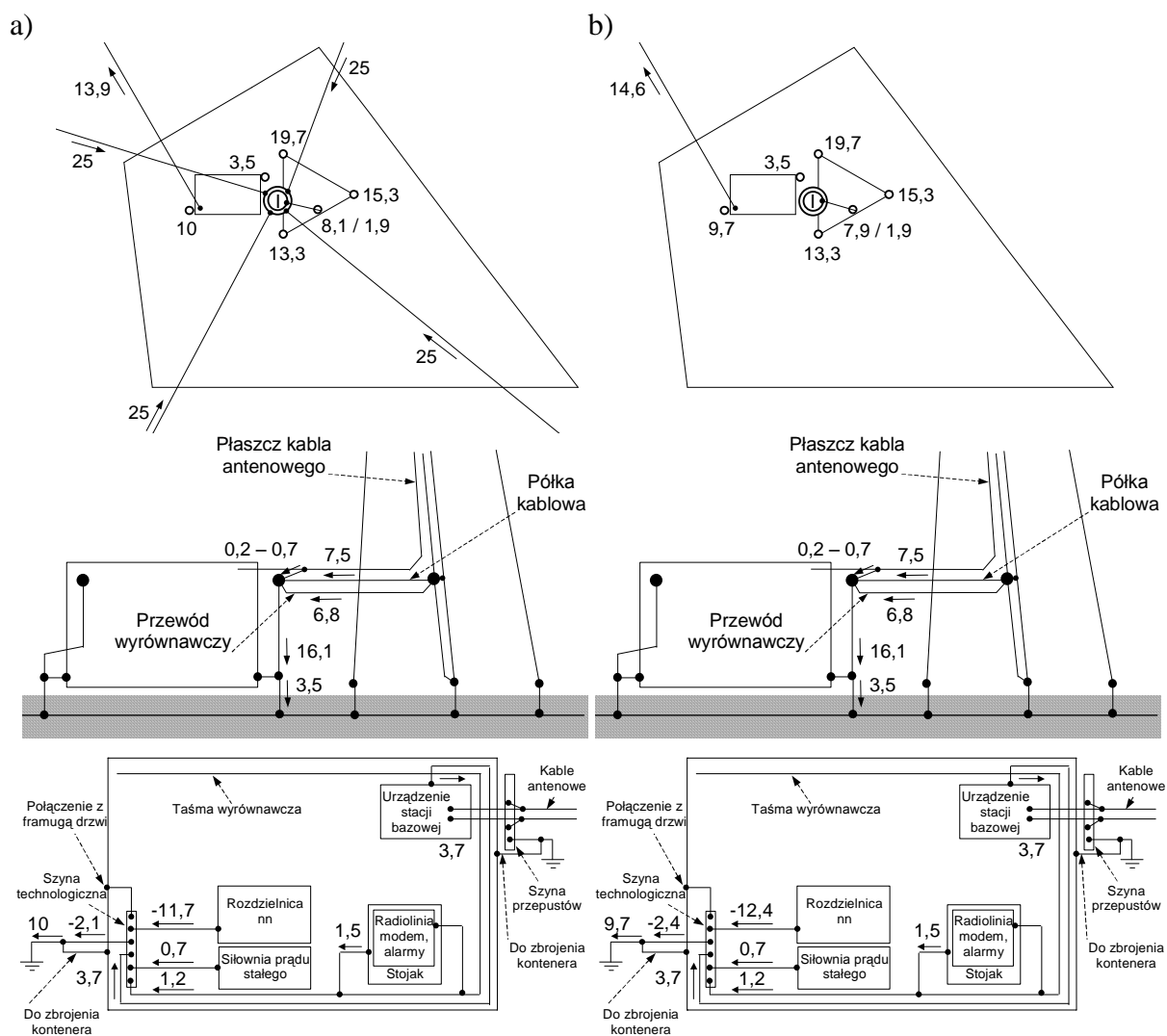
Rys. 6.18. Rozbudowany model stacji bazowej ze źródłem prądu: a) konwencjonalnym (wraz z obwodem powrotnym prądu); b) zewnętrznym

W przypadku źródła konwencjonalnego, dla którego zachodzi konieczność zamknięcia drogi powrotnej prądu (rys. 6.18 a)), elektrody pomocnicze umieszczono w odległościach 57 - 64 m od wieży (ok. 50 m od ogrodzenia stacji). Biorąc pod uwagę powierzchnię zajmowaną przez system uziomowy stacji bazowej, jej średnicę można szacować w przybliżeniu na ok. 21 m. W takim przypadku odległość umieszczenia elektrod pomocniczych od stacji bazowej powinna wynosić minimum 63 m [127]. Przyjęta odległość umieszczenia elektrod pomocniczych i przewodów powrotnych od wieży jest więc zbliżona do tej wartości.

W obu przypadkach jako przebieg prądu źródła przyjęto prąd o kształcie $5/42 \mu s$ i wartości szczytowej 72 A (prąd uzyskany w 2 serii pomiarowej badań terenowych). Wyniki obliczeń rozptyłu prądów udarowych dla obu modeli przedstawiono na rys. 6.19.

Porównanie otrzymanych podziałów prądów z rozptyłem prądu udarowego wywołanego przez konwencjonalne źródło prądu umieszczone pod wieżą (rys. 6.8 b) i 6.19 a)), wykazało istnienie następujących różnic:

- W przypadku źródła umieszczonego pod wieżą, podział prądów pomiędzy trzy słupy wsporcze jest wyraźnie zależny od usytuowania przewodu doprowadzającego prąd udarowy do wierzchołka wieży.
- Podział prądów pomiędzy przewód uziomowy szyny technologicznej a przewód ochronno-neutralny ze stacji transformatorowej zależny jest natomiast od usytuowania przewodów odprowadzających prąd udarowy do źródła i/lub od rozmieszczenia elektrod pomocniczych względem stacji bazowej i stacji transformatorowej (rys. 6.8 b) oraz 6.19 a)).
- Wzrost odległości umieszczenia przewodów powrotnych i elektrod pomocniczych od stacji bazowej (do wartości porównywalnych z odległością stacji transformatorowej od stacji bazowej) spowodował:
 - wzrost prądu odpływającego do stacji transformatorowej, o ok. 25 %;
 - zmniejszenie prądu w przewodzie uziomowym szyny technologicznej, o ok. 11 %;
 - wzrost prądów w przewodach: uziemiającym urządzenie stacji bazowej oraz łączącym zbrojenie kontenera z zaciskiem probierczym szyny przepustów; o kilkanaście procent.



Rys. 6.19. Rozpływy prądów udarowych (w % względem całkowitego prądu udarowego) w modelu nr (1) stacji, dla przypadków źródeł prądu konwencjonalnego (a) oraz zewnętrznego (b), umieszczonych na wieży

Zastosowanie zewnętrznego źródła prądu w miejsce konwencjonalnego na wieży, spowodowało dalszy wzrost wartości prądu odpływającego do stacji transformatorowej oraz

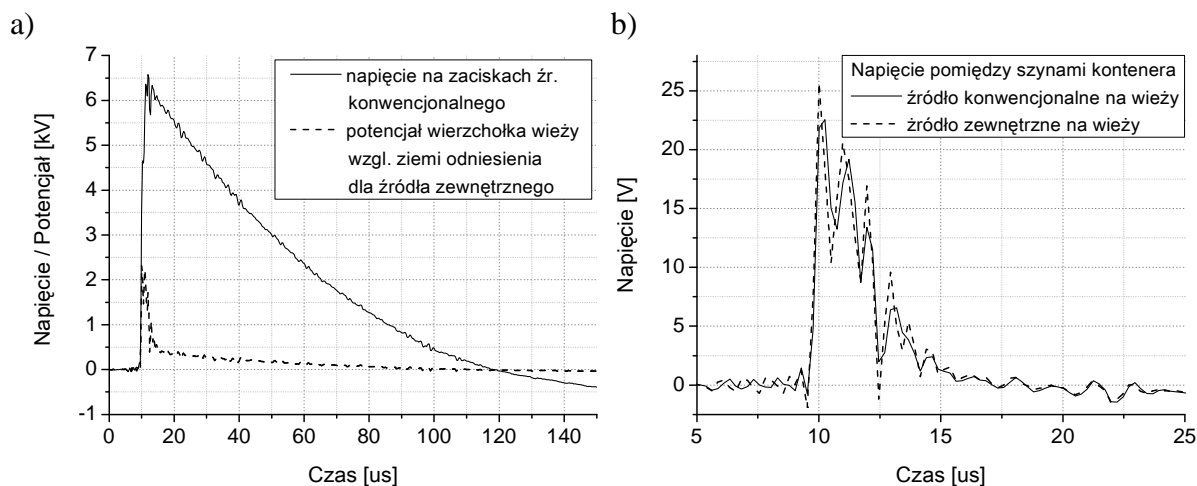
zmniejszenie prądu odprowadzanego do uziomu z przewodu uziomowego szyny technologicznej (rys. 6.19 b)). Są to jednak już tylko nieznaczne zmiany.

Analizując dalej wyniki obliczeń dla modeli numerycznych ze źródłem konwencjonalnym i zewnętrznym (rys. 6.19 a) i b)) należy stwierdzić, że poza wspomnianymi niewielkimi (kilkuprocentowymi) różnicami w podziale prądów pomiędzy przewód uziomowy szyny technologicznej a przewód ochronno-neutralny do stacji transformatorowej (przewód uziemiający rozdzielnicznym nn), rozkłady prądów w pozostałych elementach są prawie identyczne. Nieznaczna różnica w podziale prądów pomiędzy przewód uziomowy szyny technologicznej a przewód ochronno-neutralny do stacji transformatorowej może być wynikiem:

- porównywalnych odległości stacji transformatorowej oraz elektrod pomocniczych od stacji bazowej (odpowiednio ok. 60 m i 50 m);
- zbyt małej odległości umieszczenia elektrod pomocniczych od stacji bazowej (57 - 64 m od wieży oraz ok. 50 m od ogrodzenia) w porównaniu z wymaganą odległością od stacji równą trzykrotnej jej średnicy (ok. 63 m).

Może to oznaczać, że w przypadku znacznie większej odległości stacji transformatorowej, oddalenie elektrod pomocniczych na odległość 63 m od ogrodzenia stacji bazowej nie zagwarantuje tego, że w badaniach terenowych uzyska się odwzorowanie rozkładu prądów zbliżone do rzeczywistego rozkładu prądu pioruna.

Przebiegi napięcia na zaciskach konwencjonalnego źródła prądu i potencjału wierzchołka wieży względem odległej ziemi odniesienia (w przypadku źródła zewnętrznego), oraz spadków napięć występujących pomiędzy szyną technologiczną a szyną przepustów dla obu modeli z rys. 6.18, przedstawiono na rys. 6.20.



Rys. 6.20. Porównanie przebiegów: a) napięcia na zaciskach konwencjonalnego źródła prądu oraz potencjału wierzchołka wieży dla przypadku źródła zewnętrznego; b) napięć pomiędzy szyną technologiczną a szyną przepustów dla obu typów źródeł

Przebiegi spadku napięcia pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera dla obu typów źródeł praktycznie się nie różnią (rys. 6.20 b)). Wartość szczytowa tego napięcia wzrosła natomiast ok. dwukrotnie w porównaniu z przypadkiem źródła umieszczonego pod wieżą (rys. 6.16 b)).

Powyższe analizy pokazują, że oba rodzaje źródeł prądu (konwencjonalne oraz zewnętrzne) są sobie równoważne. Źródło zewnętrzne ma jednak zdecydowaną przewagę pod względem długości czasu obliczeń. Takie rozwiązanie będzie wykorzystywane w dalszej części pracy do analiz zagrożenia piorunowego.

6.5. Podsumowanie

Jako uzupełnienie spostrzeżeń sformułowanych na podstawie analiz wyników badań terenowych (rozdział 5), poniżej zebrano najważniejsze fakty dotyczące wyników pomiarów i obliczeń otrzymanych dla różnych serii pomiarowych.

Rozpływy prądów udarowych uzyskane dla przypadków badań prowadzonych z uwzględnieniem przepływu prądu w ziemi oraz badań, w których powrót prądu zrealizowano poprzez metaliczne połączenia generatora/źródła prądu z obiektem (ogrodzenie stacji):

- różnią się wartościami prądów odpływających do uziomu z głównych odprowadzeń, tj.: przewodów uziomowych słupów wsporczych wieży, drabinki i szyny uziemiającej wieży oraz szyny uziemiającej kontenera;
- w szczególności, w przypadku badań z uwzględnieniem przepływu prądu w ziemi obserwuje się znaczne wartości prądu odpływającego do stacji transformatorowej oraz sumarycznego prądu wpływającego do zbrojenia fundamentów wieży (po kilkanaście – dwadzieścia kilka procent prądu udarowego doprowadzanego do wieży);
- dają szacunkowo podobne wartości prądów przepływających przez kontener (instalacje wewnętrzne oraz zbrojenie/konstrukcję), o czym mogą świadczyć podobne wartości:
 - sumy prądów płynących w przewodach uziomowym szyny technologicznej oraz uziemiającym rozdzielniczy nn (po ok. 20 % całkowitego prądu udarowego w przypadku obliczeń oraz ok. 28 % prądu udarowego w przypadku pomiarów);
 - sumy prądów płynących w przewodach uziomowym szyny technologicznej oraz ochronno-neutralnym przyłącza zasilania ze stacji transformatorowej (po ok. 21 – 22 % całkowitego prądu udarowego, uzyskane z obliczeń);
 - prądów płynących w przewodzie uziemiającym urządzenia stacji bazowej (ok. 3,2 % oraz 3,5 % z obliczeń i ok. 6,4 % oraz 7,5 % z pomiarów);
- dają również podobne wartości prądów wpływających do zbrojenia kontenera w przypadku obliczeń (po ok. 11 – 11,5 % całkowitego prądu udarowego);
- wykazują jednak różnice w wartościach prądów wpływających do zbrojenia kontenera w przypadku pomiarów (ok. 14,4 % i 22 % prądu udarowego odpowiednio dla serii 2 i 1);
- wskazują na podobne wartości otrzymanych z obliczeń:
 - szybkości zmian prądu na czołach impulsów głównych prądów przepływających przez kontener (ok. 14,7 A/ μ s i 14,4 A/ μ s dla prądów płynących w przewodzie uziemiającym urządzenie stacji bazowej);
 - wartości spadków napięć pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera (odpowiednio ok. 10 V oraz 8 V dla serii 2 oraz 1).

Ostatnie spostrzeżenia wskazują, że dla właściwego oszacowania spadków napięć w kontenerze najbardziej istotne jest nie tyle dokładne odwzorowanie w modelu stacji przepływu prądów w instalacjach wewnętrznych i zbrojeniu kontenera, ile przybliżone zachowanie właściwego podziału głównych prądów przepływających przez kontener, tj. sumy prądów wpływających z kontenera (prądy płynące w przewodzie uziomowym szyny technologicznej oraz w przyłączy zasilania ze stacji transformatorowej) lub sumy prądów wpływających do kontenera (prądy wpływające do zbrojenia, prądy płynące w przewodach uziemiających urządzenia stacji bazowej, pierścienia wyrównawczego i innych urządzeń w kontenerze).

Analiza porównawcza wyników pomiarów terenowych oraz obliczeń numerycznych prowadzi do sformułowania następujących spostrzeżeń:

- Uzyskano zadawalającą dokładność (do ok. 34 %) odwzorowania w modelu numerycznym stacji, otrzymanego w wyniku pomiarów terenowych przepływu prądów udarowych pomiędzy główne odprowadzenia łączące nadziemne części konstrukcji i instalacji z uziomem stacji.

- Różnice w rozptywach prądów udarowych otrzymanych z obliczeń w stosunku do uzyskanych z pomiarów, w przypadku prądów płynących w poszczególnych przewodach wyrównawczych i uziemiających urządzeń są już jednak znacznie większe (sięgają ok. 50 %, a nawet ok. 80 % w przypadku prądów o stosunkowo małych wartościach szczytowych).
- Większe rozbieżności pomiędzy pomiarami a obliczeniami stwierdzono w przypadku serii pomiarowej 2, w której uwzględniono przepływ prądu w ziemi w porównaniu z przypadkiem serii 1, w której powrót prądu zrealizowano przez metaliczne połączenia generatora/źródła z ogrodzeniem stacji. Rozbieżności te układały się odmiennie dla obu serii pomiarowych, tzn. jeśli w serii 1 obserwowano mniejsze wartości szczytowe prądów wpływających do uziomów z obliczeń, to w serii 2 mniejsze wartości szczytowe tych prądów obserwowano w pomiarach (rys. 6.4, 6.8).
- Przebiegi prądów płynących w elementach konstrukcji i instalacji stacji bazowej zależą od konfiguracji uziomu stacji transformatorowej oraz jej odległości od stacji bazowej (rys. 6.9). Jednak w analizowanym zakresie zmian zależność ta nie jest na tyle istotna w obliczeniach, aby mogła być główną przyczyną rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów lub by znacząco przybliżała wyniki obliczeń do wyników pomiarów.
- Wartości spadków napięć na przewodzących elementach konstrukcji i instalacji stacji charakteryzują się znacznie słabszą zależnością od rezystywności gruntu niż wartość napięcia na zaciskach źródła prądu (w analizowanym zakresie zmian 200 – 1260 Ωm zaobserwowano wzrost napięcia pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera o ok. 38 % oraz wzrost napięcia na zaciskach źródła prądu o ok. 480 %).
- Analiza przebiegów napięć otrzymanych dla modeli gruntów dwuwarstwowego oraz jednorodnych o różnych wartościach rezystywności (rys. 6.16) wskazuje jednak, że wartości tych napięć mogą zależeć od podziału prądów odprowadzanych przez poszczególne warstwy ziemi (wzrost rezystywności dolnej warstwy z 260 Ωm w modelu jednorodnym do 1060 Ωm w modelu dwuwarstwowym spowodował wzrost napięcia pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera, prawdopodobnie w wyniku wzrostu prądu płynącego przez warstwę górną).
- Powyższe spostrzeżenie oraz zauważony wcześniej fakt, że po zmianie układu doprowadzającego/odprowadzającego prąd udarowy do/ze stacji, wartości głównych prądów przepływających przez kontener nie uległy zasadniczej zmianie w przypadku obliczeń natomiast niektóre z nich zmieniły się w przypadku pomiarów, mogą potwierdzać sformułowane wcześniej przypuszczenia o roli dokładności odwzorowania rzeczywistej struktury oraz rezystywności gruntu w modelu numerycznym.
- Pokazano, że model nr (2) stacji bazowej jest wystarczający do prawidłowego oszacowania spadków napięć w kontenerze. W porównaniu z modelem nr (1) nie powoduje zasadniczych zmian w wartościach spadków napięć oraz rozptywach prądów najbardziej istotnych dla oceny zagrożenia piorunowego (napięcie pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera, prądy w przewodach uziemiających urządzenia stacji bazowej i rozdzielniczy nn, prąd w przewodzie uziomowym szyny technologicznej, prąd wpływający do zbrojenia kontenera i prąd odprowadzany do stacji transformatorowej).
- Uproszczenia modelu nr (2) spowodowały istotne zmiany podziału prądów udarowych tylko w tych elementach lub w otoczeniu tych elementów, które uległy uproszczeniu. Ponieważ zmiany te spowodowały pogłębienie się obserwowanych różnic pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów, wydaje się uzasadnionym stwierdzenie, że jednym z głównych powodów rozbieżności obliczeń i pomiarów (obok uproszczeń modelu gruntu) są także uproszczenia zastosowane przy modelowaniu poszczególnych elementów instalacji i konstrukcji metalowych stacji i/lub brak czy nieuwzględnienie w modelu dokładnych informacji o tych elementach.

- Dalsze możliwe przyczyny rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń i pomiarów to błędy czy uproszczenia metody numerycznej (w szczególności związane ze sposobem podziału na segmenty poszczególnych elementów modelu stacji).
- Wartości wspomnianych wyżej prądów, najbardziej istotnych dla prawidłowej oceny zagrożenia piorunowego, otrzymane z obliczeń, są niższe od uzyskanych z pomiarów o ok. 17 – 50 %. Rzeczywiste wartości prądów oraz napięć w kontenerze mogą się więc różnić od obliczonych maksymalnie w podobnym stopniu. Spodziewać się jednak można, że błąd oceny wartości napięć w kontenerze będzie mniejszy niż wspomniane 50 %, ponieważ napięcia te przypuszczalnie zależą bardziej od wypadkowych prądów płynących przez kontener niż od poszczególnych prądów o relatywnie małych wartościach.
- Zaobserwowano wyraźną tendencję do wzrostu prądu odpływającego do stacji transformatorowej oraz zmniejszenia prądu płynącego w przewodzie uziomowym szyny technologicznej wraz ze wzrostem odległości umieszczenia przewodów powrotnych oraz elektrod pomocniczych względem stacji bazowej. Na obserwowaną zależność wpływ mógł mieć fakt porównywalnych odległości stacji transformatorowej oraz elektrod pomocniczych od stacji bazowej.
- Pokazano, że źródła prądowe idealne i rzeczywiste dają zbliżone wyniki. Ze względu na prostsze i mniej czasochłonne obliczenia, w analizach numerycznych układu generator-obiekt badany uzasadnione jest więc stosowanie źródła idealnego.
- Wykazano również, że konwencjonalne źródło prądu oraz źródło zewnętrzne są sobie równoważne, jeśli chodzi o rozpręwy prądów i rozkłady napięć w stacji.

Uwzględniając przedstawione wyżej spostrzeżenia, sformułowane na podstawie analiz wyników obliczeń i pomiarów terenowych, za punkt wyjścia do dalszych analiz numerycznych przyjęto model podstawowy (model nr (2)) stacji bazowej, jako wystarczający do właściwego wyznaczenia napięć oraz prądów istotnych z punktu widzenia oceny zagrożenia piorunowego urządzeń.

Ze względu na istotne skrócenie czasu obliczeń w porównaniu z przypadkiem konwencjonalnego idealnego źródła prądu, do symulacji rzeczywistych wyładowań piorunowych w dalszej części pracy zastosowane będzie źródło zewnętrzne.

7. Bezpośrednie wyładowanie pioruna w wieżę stacji

W niniejszym rozdziale przedstawione zostaną wyniki analiz numerycznych zagrożenia urządzeń podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego w wierzchołek wieży stacji bazowej. Za główną miarę zagrożenia przyjęto:

- różnice potencjałów pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera;
 - napięcie pomiędzy rozwartymi żyłami przewodu zasilającego w prąd stały urządzenie stacji bazowej (rozdział 6.1);
 - rozptyły prądów w stacji ze szczególnym uwzględnieniem prądu wpływającego do zewnętrznej instalacji zasilającej (przewód ochronno-neutralny ze stacji transformatorowej).
- Analizowano także zmiany potencjału wierzchołka wieży względem odległej ziemi odniesienia oraz napięcia wytworzonego przez prąd indukowany w dwużyłowym przewodzie sygnałowym wewnątrz kontenera (rozdział 6.1).

W prowadzonych obliczeniach stosowano zewnętrzne źródło prądu, które w zależności od przyjętego modelu wyładowania umieszczano w punkcie uderzenia pioruna na wieży lub na szczycie kilkuset metrowego kanału wyładowania.

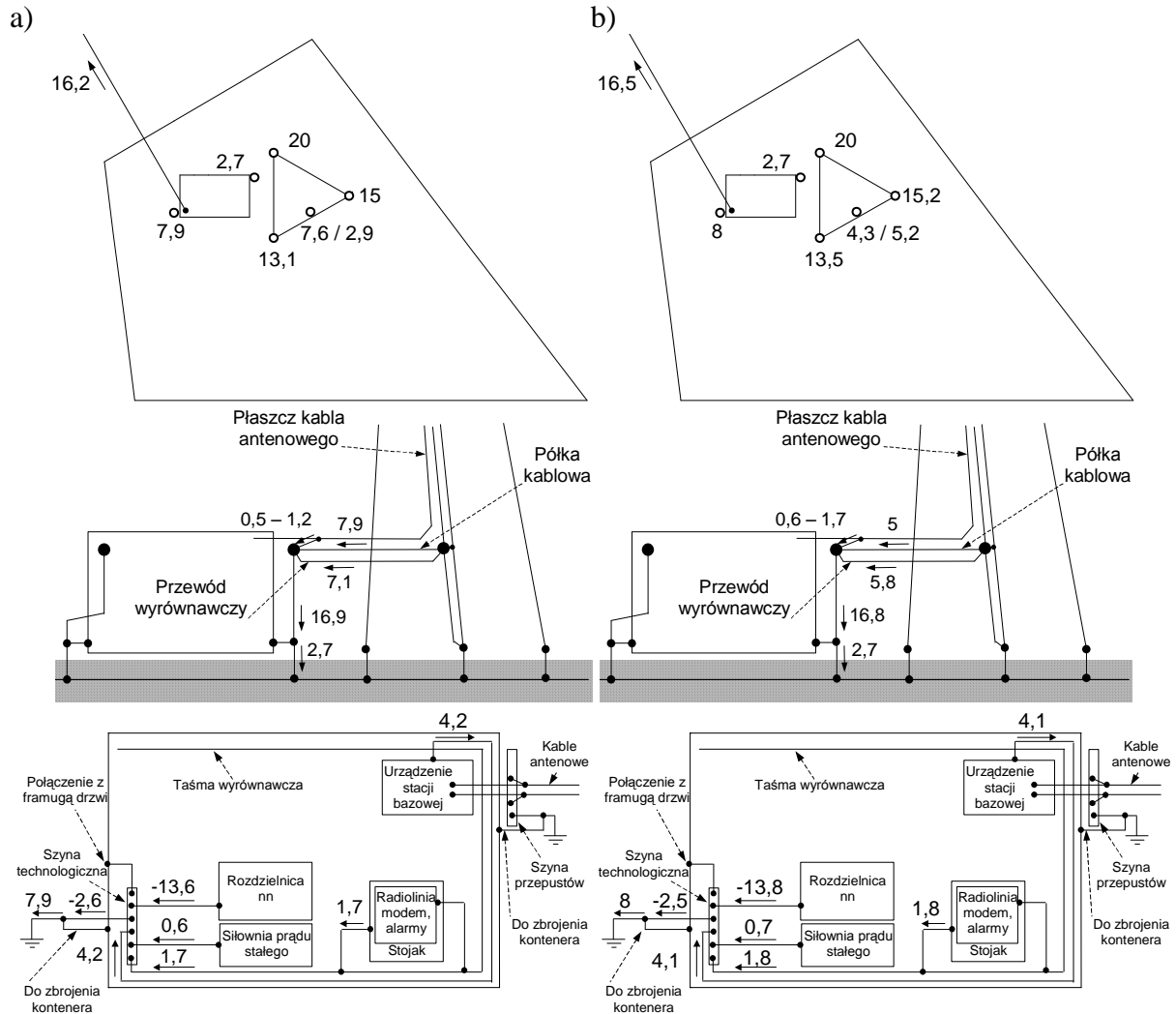
Założono, że sprzężenia indukcyjne, pojemnościowe i elektromagnetyczne pomiędzy rozciągającym się od wierzchołka wieży do chmury burzowej kanałem wyładowania a elementami instalacji i konstrukcji stacji znajdującymi się nisko (kilka metrów) nad ziemią, są do pominięcia. Uzasadniają to duża odległość pomiędzy tymi elementami (wysokość wieży) oraz fakt, że kanał wyładowania podobnie jak antena pionowa promieniuje głównie w płaszczyźnie poziomej. Uwzględniono za to zjawiska falowe, które jako skutek wzajemnych oddziaływań pomiędzy kanałem wyładowania a trafionym obiektem, mogą w istotny sposób wpływać na przebieg prądu w wierzchołku wieży oraz w pozostałych elementach konstrukcji i instalacji stacji.

7.1. Pierwsze wyładowanie główne

W analizach odpowiadających pierwszemu wyładowaniu głównemu założono, że zjawiska falowe zachodzące w wieży można pominąć. Uzasadnia to krótki czas potrzebny na przebycie przez falę drogi wzdłuż wieży w porównaniu z czasem narastania czoła prądu pioruna. W takich warunkach, przebiegi prądów w wierzchołku oraz u podstawy wieży powinny charakteryzować się zbliżonym kształtem.

Uwzględniając przyjęte założenia, do odwzorowania uderzenia pioruna w wieżę zastosowano zewnętrzne źródło prądu dołączone do jednego ze zwodów pionowych na wieży. Ze źródła tego w konstrukcję wieży wpływał prąd udarowy o parametrach pierwszego wyładowania głównego (równanie (2.2)), o wartości szczytowej 100 kA (wartość wymagana dla III poziomu ochrony).

Otrzymane rozptyły prądów w przewodzących elementach konstrukcji i instalacji stacji bazowej Karczmisko dla przypadków modeli rozbudowanego oraz podstawowego przedstawiono na rys. 7.1. W obu przypadkach przyjęto dwuwarstwowy model gruntu 260/1060 Ωm .



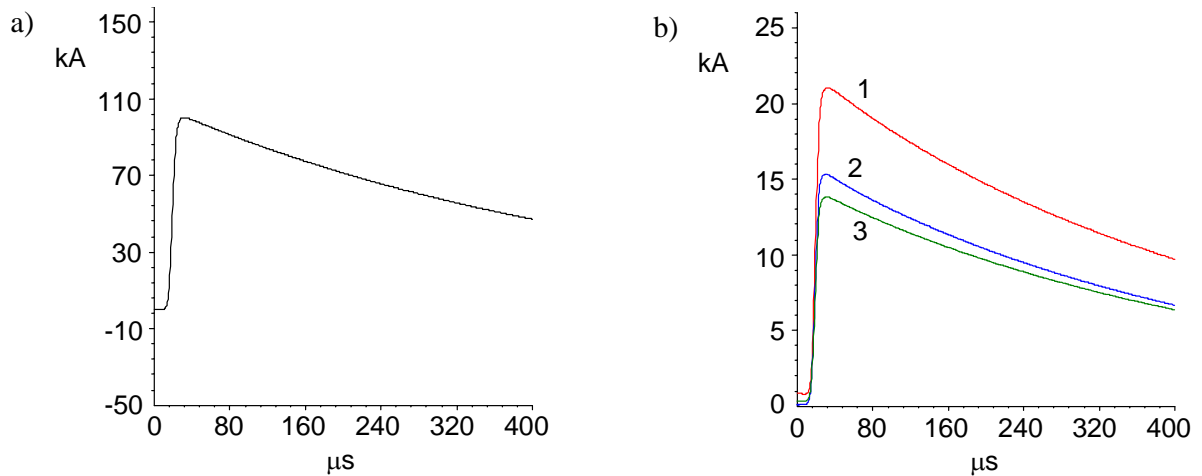
Rys. 7.1. Rozpływy prądu 100 kA, 10/350 μ s w przewodzących elementach stacji bazowej (podano wartości szczytowe w [kA]): a) model nr (1); b) model nr (2)

Prądy odprowadzane do uziomu stacji z poszczególnych słupów wsporczych wieży wynoszą po ok. 13 – 20 kA. Do tego należy doliczyć jeszcze prądy odprowadzane za pośrednictwem elementów zbrojenia fundamentów wieży, średnio po ok. 5 kA na każdy słup wsporczy.

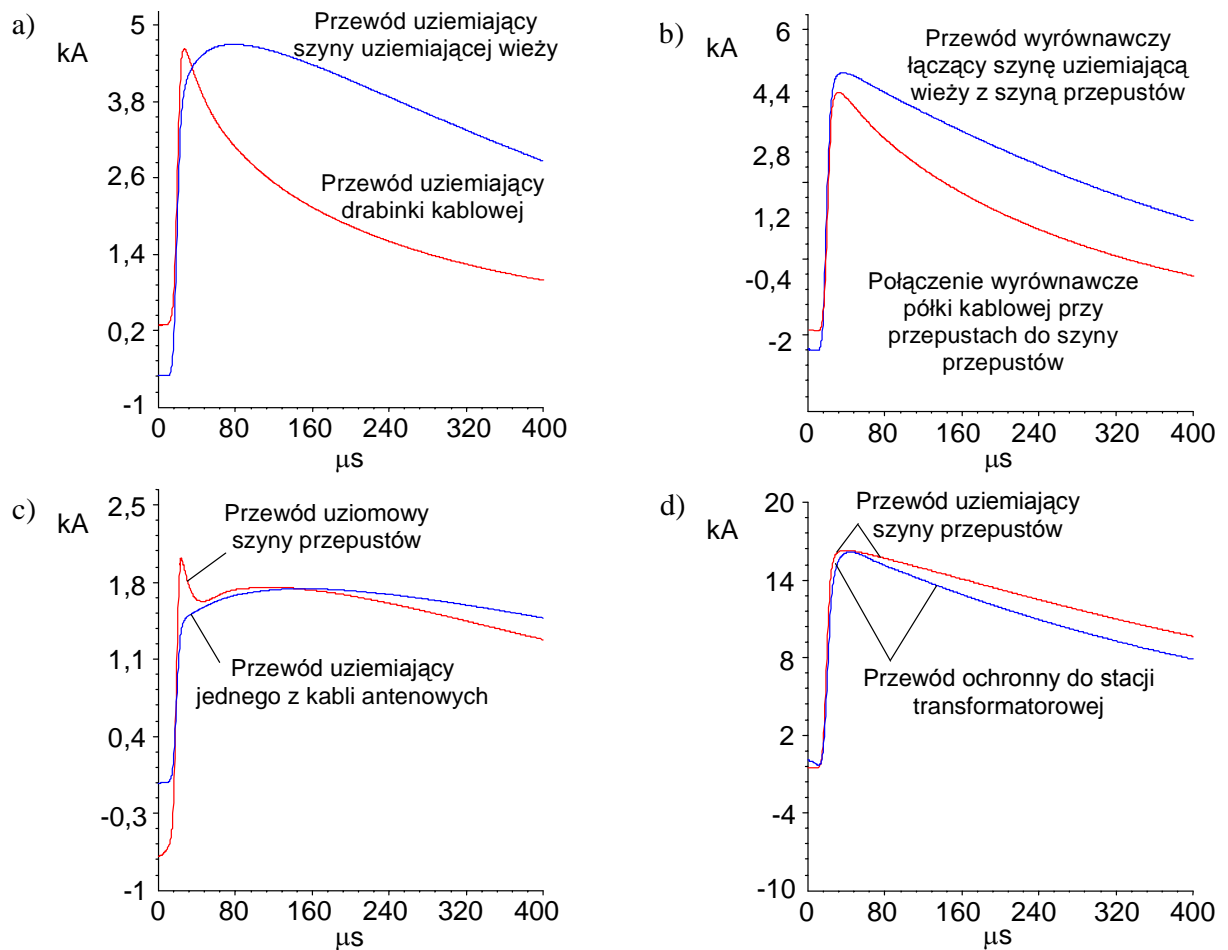
Prąd odprowadzany przewodem neutralno-ochronnym do stacji transformatorowej, wyniósł ok. 16 kA, natomiast sumaryczny prąd odprowadzany do uziomu za pośrednictwem przewodów uziomowych szyn uziemiających kontenera, ok. 11 kA.

Warto także zauważyć, że nastąpiły wyraźne zmiany w podziale prądu udarowego o kształcie 10/350 μ s (model nr (1)) w porównaniu z analizowanym dotychczas przypadkiem prądu udarowego o kształcie 5/42 μ s (rys. 6.19 b)).

Charakter podziału prądu udarowego 10/350 μ s dla obu analizowanych modeli stacji (rys. 7.1 a) i b)) jest podobny, jeśli chodzi o te miejsca, które uznano za najistotniejsze z punktu widzenia oceny zagrożenia piorunowego. Różnice w podziałach prądów w pozostałych punktach wynikają z określonych uproszczeń modelu stacji i są podobne, jak w przypadku prądu udarowego 5/42 μ s (rozdział 6.3). Potwierdza to słuszność przyjętych uproszczeń także w przypadku prądu piorunowego. Uwzględniając ten fakt, w dalszej części pracy szczegółowo przeanalizowano zjawiska zachodzące w modelu nr (2) stacji bazowej. Na rysunkach 7.2 – 7.4 przedstawiono przebiegi czasowe prądów płynących w wybranych elementach konstrukcji i instalacji dla tego modelu stacji.



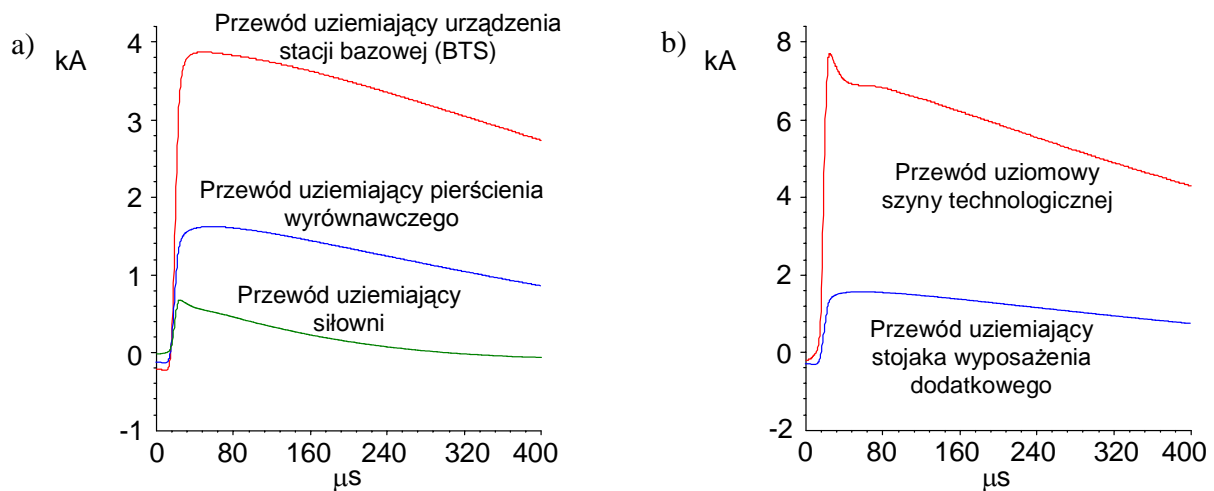
Rys. 7.2. Przebiegi prądów: a) wpływający do zwodu pionowego; b) płynące w poszczególnych przewodach uziemiających słupów wsporczych wieży; (model nr (2))



Rys. 7.3. Przebiegi prądów płynących w wybranych przewodach uziomowych, uziemiających i wyrównawczych w stacji (model nr (2))

Otrzymane wyniki wskazują, że jedynie prądy wpływające do uziomu ze słupów wsporczych wieży mają kształty zgodne z kształtem prądu doprowadzanego do wierzchołka wieży (rys. 7.2). Pozostałe przebiegi prądów, szczególnie te o niewielkich wartościach szczytowych, są mniej lub bardziej odkształcone. Odmienny charakter wykazują np. kształty prądów odprowadzanych do uziomu z drabinki kablowej oraz z szyny uziemiającej wieży

(rys. 7.3 a)), choć już przebieg sumaryczny tych prądów (nie pokazano w pracy) ma kształt zgodny z przebiegiem prądu w zwodzie pionowym. Ujawnia się tu rola geometrii i właściwości elektrycznych poszczególnych elementów konstrukcji i instalacji. W przebiegach prądów odprowadzanych do uziomów z obu szyn uziemiających kontenera (rys. 7.3 c) oraz 7.4 b)) zauważyć można „krótkie impulsy” na czole a następnie mniej lub bardziej widoczne „preregulowanie” oraz łagodne opadanie. Prądy w przewodach uziemiających urządzeń i ekranów kabli antenowych charakteryzują się natomiast spłaszczeniem w części szczytowej. Podobne różnice w kształtach niektórych prądów ujawniały się także dla prądu udarowego 5/42 μ s.

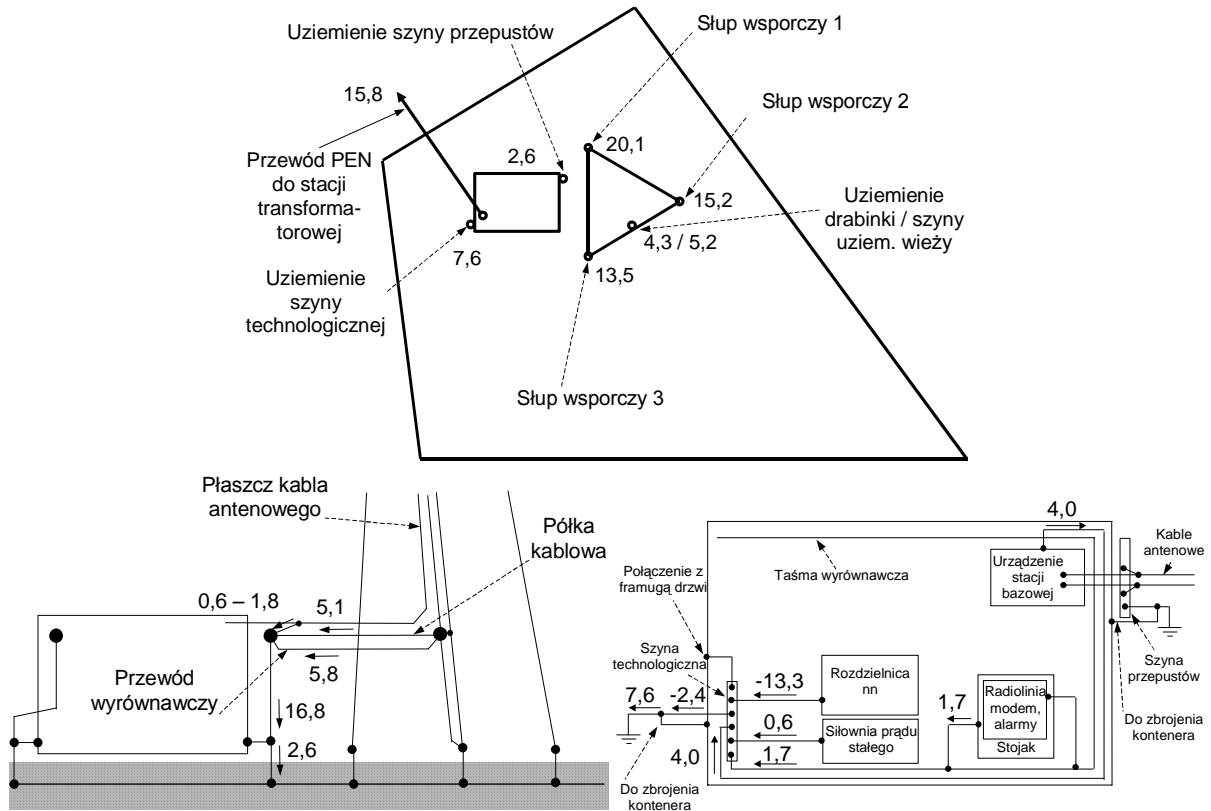


Rys. 7.4. Przebiegi prądów płynących w wybranych przewodach uziomowych i uziemiających w stacji (model nr (2))

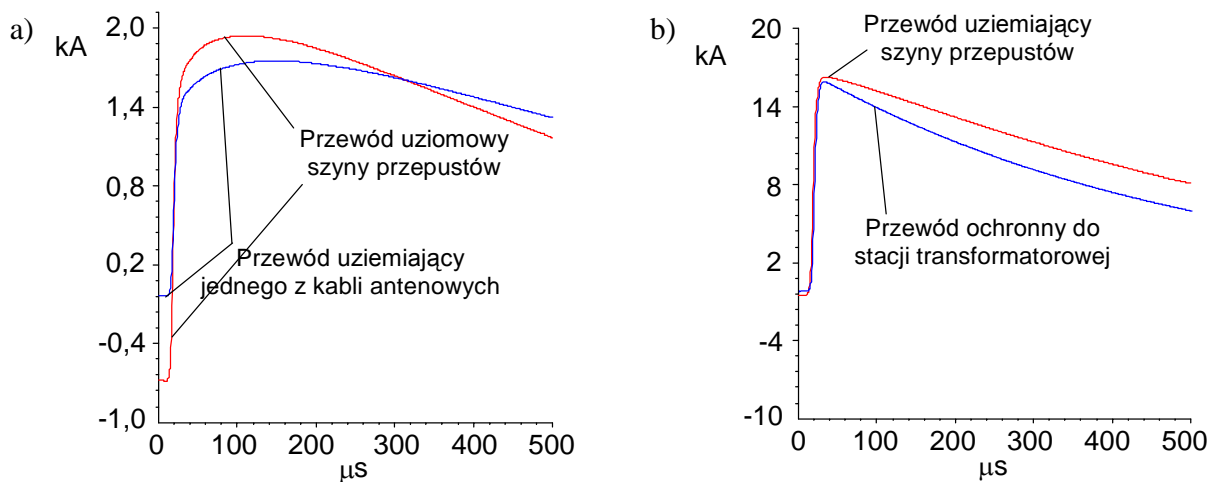
Przebiegi niektórych prądów charakteryzują się ponadto przesunięciem wartości początkowej względem wartości zerowej (rys. 7.3 a), b), c)). Jest to cecha oprogramowania związana prawdopodobnie z uproszczeniami lub niedokładnością metody numerycznej dla składowej stałej lub składowych niskoczęstotliwościowych. W grę wchodzić może w pewnym stopniu również niedokładność reprezentacji widmowej tych przebiegów (zbyt mały zbiór częstotliwości, dla których wykonano obliczenia).

Wyniki analogicznych obliczeń dla modelu nr (2) stacji, w przypadku zastąpienia dwuwarstwowego modelu gruntu gruntem jednorodnym o rezystywności 1200 Ω m, przedstawiono na rys. 7.5 – 7.7.

Rozpływy prądów w stacji dla obu modeli gruntów (rys. 7.1 b) oraz 7.5), różnią się jedynie wartościami prądów odprowadzanego do stacji transformatorowej (16,5 kA i 15,8 kA odpowiednio dla gruntu dwuwarstwowego i jednorodnego) oraz wpływającego do uziomu z zacisku probierczego pod szyną technologiczną (odpowiednio 8 kA i 7,6 kA). Wartości obu tych prądów w przypadku gruntu jednorodnego 1200 Ω m są nieznacznie mniejsze w porównaniu z przypadkiem gruntu dwuwarstwowego 260/1060 Ω m. Powstały niedobór prądu w modelu jednorodnym został przypuszczalnie skompensowany przez większe wartości prądów odprowadzanych poprzez elementy zbrojenia stóp fundamentowych wieży. Przyczyną obserwowanych podziałów prądów są przypuszczalnie specyficzne zmiany właściwości udarowych (wartości impedancji udarowych) poszczególnych elementów uziomu stacji bazowej oraz uziomu stacji transformatorowej przy zmianach rezystywności gruntu [65, 66, 67, 68, 79, 108]. Ponieważ zaobserwowane różnice w wartościach prądów są niewielkie, ich przyczyną mogą być także błędy numeryczne.



Rys. 7.5. Rozpływ prądu 100 kA, 10/350 μ s w stacji (podano wartości szczytowe w [kA]): model nr (2), grunt jednorodny o rezystywności 1200 Ω m

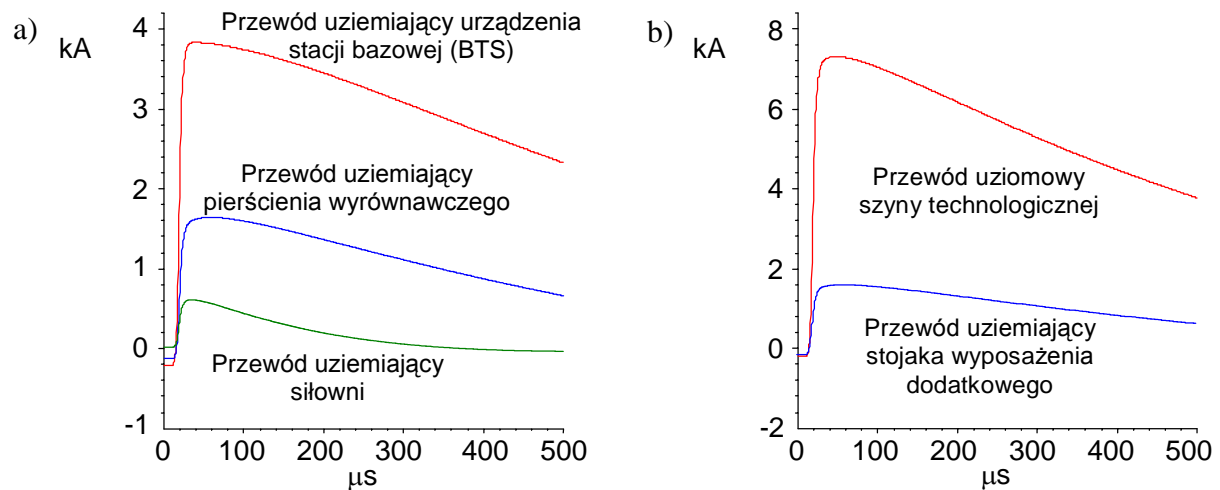


Rys. 7.6. Przebiegi prądów płynących w wybranych przewodach uziomowych i uziemiających w stacji: model nr (2), grunt jednorodny o rezystywności 1200 Ω m

Dla obu przypadków gruntów zaobserwować można różnice w kształtach prądów. Dotyczy to szczególnie prądów płynących w przewodach uziomowych szyn uziemiających kontenera. W przypadku gruntu o niskiej rezystywności, a za taki można w przybliżeniu uważać grunt dwuwarstwowy 260/1060 Ω m (rys. 6.16 a)), prądy płynące w przewodach uziomowych szyn uziemiających kontenera charakteryzują się krótkim impulsem na czole a następnie przeregulowaniem i łagodnym opadaniem (rys. 7.3 c) i 7.4 b)). W przypadku gruntu o wysokiej rezystywności (1200 Ω m) te same prądy wykazują bardziej lub mniej wyraźne spłaszczenie w części szczytowej przebiegu tuż po czole impulsu (rys. 7.6 a) i 7.7 b)). Kształty prądów płyn-

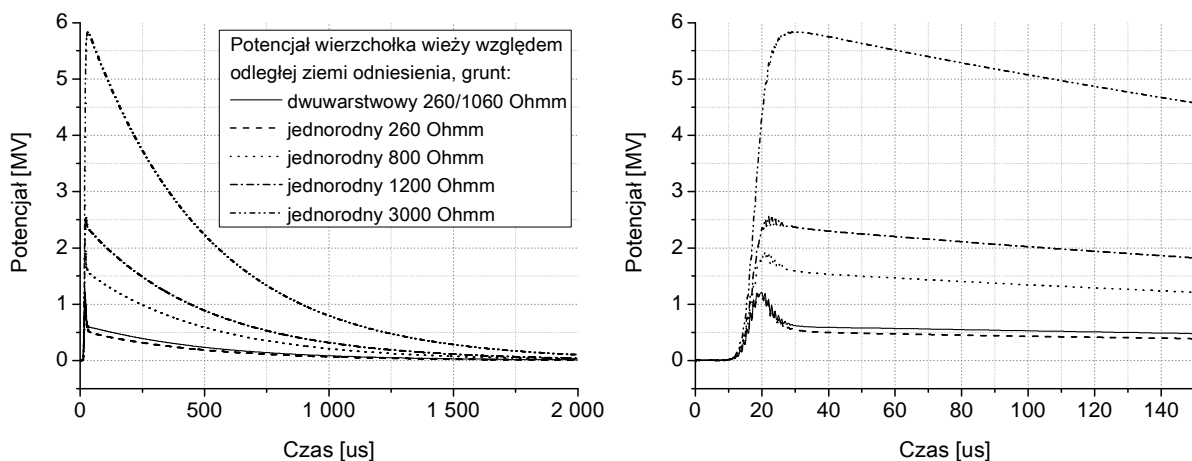
nących w przewodach wyrównawczych oraz uziemiających urządzeń i ekranów kabli antenowych nie uległy zasadniczej zmianie.

Odształcenia przebiegów prądów płynących w różnych elementach tego samego modelu stacji oraz w tych samych elementach modelu przy różnej rezystywności gruntu, są wynikiem geometrii i właściwości elektrycznych poszczególnych elementów konstrukcji i instalacji w modelu, prowadzących do indywidualnych różnic w wartościach rezystancji oraz indukcyjności własnych i wzajemnych tych elementów.

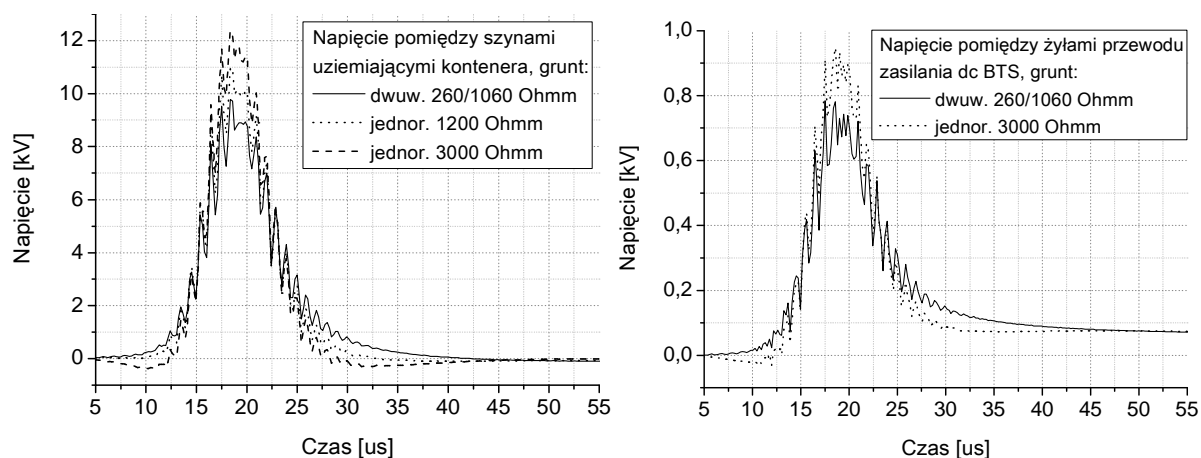


Rys. 7.7. Przebiegi prądów płynących w wybranych przewodach uziomowych i uziemiających w stacji: model nr (2), grunt jednorodny o rezystywności 1200 Ωm

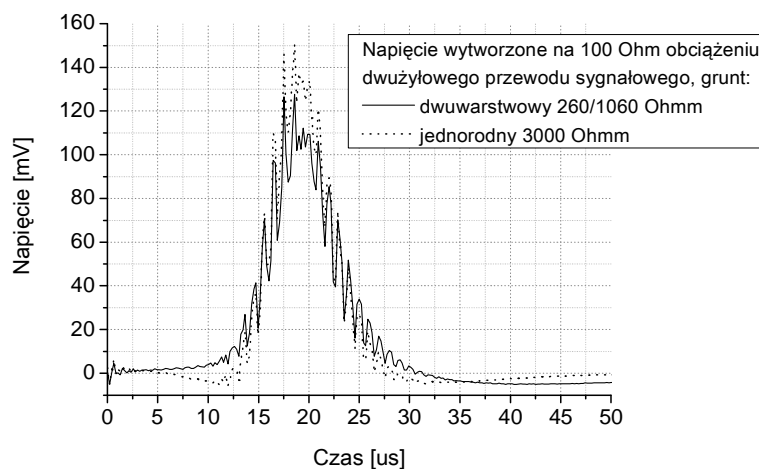
Ponieważ ocenę zagrożenia piorunowego urządzeń oparto m.in. na oszacowaniu wybranych napięć i potencjałów w stacji, prowadzono równocześnie obliczenia tych napięć i potencjałów dla gruntów o różnych strukturach oraz różnych wartościach rezystywności. Wybrane wyniki tych analiz, w postaci przebiegów potencjału wierzchołka wieży względem odległej ziemi odniesienia oraz spadków napięć w kontenerze, przedstawiono na rys. 7.8 – 7.10 [71]. Ze względu na trudności z odczytem, na rysunkach 7.9 oraz 7.10 przedstawiono przebiegi napięć odpowiadające tylko wybranym modelom gruntu. Wartości szczytowe analizowanych przebiegów potencjału wierzchołka wieży oraz spadków napięć dla wszystkich analizowanych modeli gruntu zestawiono w tabelicy 7.1.



Rys. 7.8. Przebiegi potencjału wierzchołka wieży względem odległej ziemi odniesienia, dla modelu nr (2) stacji oraz różnych modeli gruntu



Rys. 7.9. Przebiegi spadków napięć pomiędzy szyną technologiczną a szyną przepustów oraz pomiędzy rozwartymi żyłami przewodu zasilania dc urządzenia stacji bazowej, dla modelu nr (2) stacji oraz różnych modeli gruntu



Rys. 7.10. Przebiegi napięcia na $100\ \Omega$ rezystancji obciążenia przewodu sygnałowego w kontenerze, dla modelu nr (2) stacji oraz różnych modeli gruntu

Tablica 7.1. Zestawienie wartości szczytowych potencjału wierzchołka wieży oraz spadków napięć w modelu nr (2) stacji dla różnych modeli gruntu

Model gruntu	Potencjał wierzchołka wieży względem ziemi odniesienia [MV]	Napięcie pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera [kV]	Napięcie pomiędzy żyłami przewodu zasilania dc BTS [kV]	Napięcie wytworzone w przewodzie sygnałowym [mV]
Dwuwarstwowy 260/1060 Ω m	1,20	8,98	0,72	110
Jednorodny 260 Ω m	1,18	9,10	0,71	110
Jednorodny 800 Ω m	1,87	9,80	0,76	130
Jednorodny 1200 Ω m	2,47	10,30	0,78	130
Jednorodny 3000 Ω m	5,83	11,80	0,89	170

Dla analizowanych modeli gruntów znaczne zmiany kształtów wystąpiły tylko w przypadku przebiegów potencjału wierzchołka wieży względem odległej ziemi odniesienia.

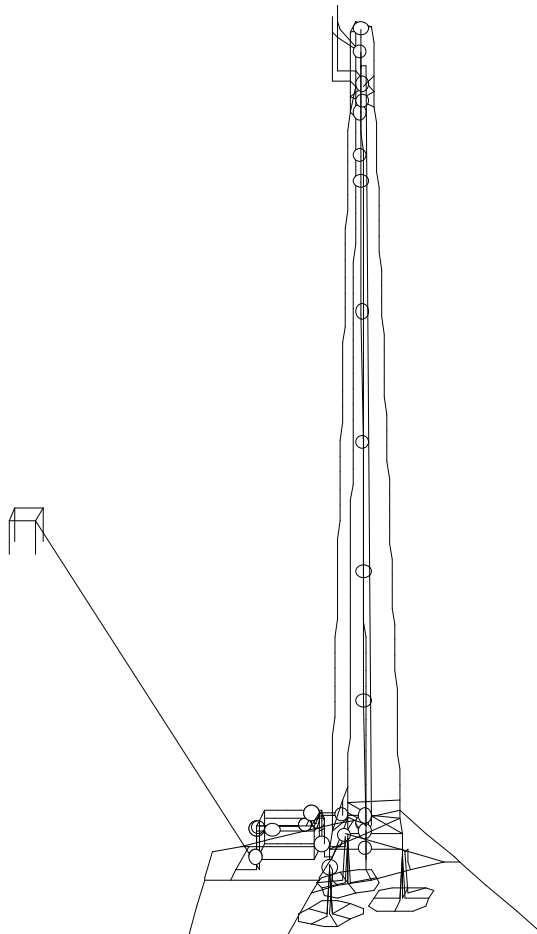
Przy wzroście rezystywności gruntu z $260 \Omega\text{m}$ do $3000 \Omega\text{m}$ zaobserwowano natomiast wzrost wartości szczytowych:

- potencjału wierzchołka wieży o ok. 390 %;
- napięcia pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera o ok. 33 %;
- napięcia pomiędzy żyłami przewodu zasilania dc urządzenia stacji bazowej o ok. 25 %;
- napięcia wytworzonego przez prąd indukowany w przewodzie sygnałowym o ok. 54 %.

Rozważając możliwości skrócenia czasu obliczeń poprzez uproszczenie modelu stacji, przeprowadzono dodatkowo analizy wpływu zmian w szczegółowości odwzorowania w modelu elementów instalacji i konstrukcji przewodzących stacji na przebiegi analizowanych napięć. Badano następujące konfiguracje:

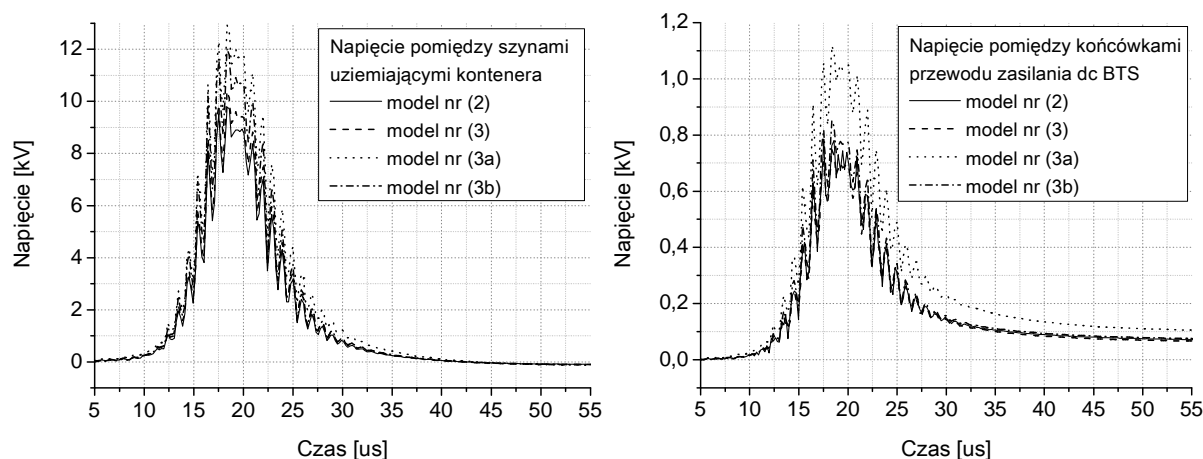
- **Model nr (3) (model uproszczony, rys. 7.11):** utworzony na bazie modelu nr (2), w którym nie uwzględniono ukośnych elementów konstrukcji wieży na wysokościach od ok. 4 m do 54 m oraz ogrodzenia stacji. Dodatkowo uproszczono zbrojenie kontenera (do postaci siatki połączeń tworzących tylko krawędzie prostopadłościanu bez dodatkowych elementów na bokach), oraz uwzględniono tylko jeden kabel antenowy wzdłuż wieży.
- **Model nr (3a):** utworzony na bazie modelu nr (3), w którym zredukowano do minimum zbrojenie kontenera (do postaci pojedynczego przewodu łączącego odpowiednie zaciski probiercze pod szyną przepustów i pod szyną technologiczną).
- **Model nr (3b):** utworzony na bazie modelu nr (3), w którym pominięto uziomy otokowe wokół stóp fundamentowych oraz zbrojenie fundamentów wieży.

Dla wszystkich konfiguracji przyjęto grunt dwuwarstwowy $260/1060 \Omega\text{m}$.



Rys. 7.11. Uproszczony model stacji bazowej – model nr (3)

Przebiegi wybranych napięć dla analizowanych modeli stacji przedstawiono na rys. 7.12 [71], a wartości szczytowe wszystkich rozważanych napięć oraz potencjału wierzchołka wieży względem odległej ziemi odniesienia zestawiono w tabelicy 7.2.



Rys. 7.12. Przebiegi napięć pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera oraz pomiędzy żyłami przewodu zasilania dc urządzenia stacji bazowej dla różnych modeli stacji

Tablica 7.2. Zestawienie wartości szczytowych potencjału wierzchołka wieży oraz napięć, wyznaczonych dla różnych modeli stacji

Model stacji	Potencjał wierzchołka wieży względem ziemi odniesienia [MV]	Napięcie pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera [kV]	Napięcie na zaciskach zasilania prądem stałym BTS [kV]	Napięcie indukowane w kablu sygnałowym [mV]
Model nr (2)	1,20	8,98	0,72	110
Model nr (3)	1,22	9,66	0,70	280
Model nr (3a)	1,22	12,15	1,07	360
Model nr (3b)	1,25	10,94	0,79	310

Uproszczenia w odwzorowaniu wybranych elementów instalacji i konstrukcji metalowych stacji zastosowane w modelu nr (3), w odniesieniu do modelu nr (2), spowodowały:

- jedynie kilkuprocentowe zmiany wartości potencjału wierzchołka wieży oraz spadków napięć pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera i pomiędzy końcówkami przewodu zasilania w prąd stały urządzenia stacji bazowej;
- znaczący, ok. 150 % wzrost wartości napięcia wytworzonego przez prąd indukowany w kablu sygnałowym, wskazując na istotną rolę ekranującą sieci przewodów reprezentujących zbrojenie kontenera zastosowaną w modelu nr (2).

Zastosowanie dalszych uproszczeń w modelach nr (3a) i nr (3b), w odniesieniu do modelu nr (3), spowodowało wzrost wartości napięć:

- w modelu nr (3a):
 - pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera o ok. 26 %;
 - pomiędzy końcówkami przewodu zasilania dc urządzenia stacji bazowej o ok. 53 %;
 - wytworzonego przez prąd indukowany w przewodzie sygnałowym o ok. 29 %;
- w modelu nr (3b):
 - pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera o ok. 13 %;
 - pomiędzy końcówkami przewodu zasilania dc urządzenia stacji bazowej o ok. 13 %;
 - wytworzonego przez prąd indukowany w przewodzie sygnałowym o ok. 11 %.

Wartości szczytowe napięć indukowanych w okablowaniu sygnałowym dla wszystkich analizowanych modeli stacji są niewielkie, nie przekraczają 400 mV, nie stanowią więc istotnego źródła zagrożenia dla urządzeń.

Uwzględniając powyższe spostrzeżenia, do dalszych analiz przyjęto model nr (3) jako wystarczający do poprawnego oszacowania wartości spadków napięć powstających pomiędzy elementami instalacji przewodzących w kontenerze oraz do oceny zagrożenia urządzeń.

7.2. Analiza zjawisk falowych

Podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w wysokie obiekty budowlane obserwuje się zjawiska związane z propagacją fal prądowych w konstrukcjach tych obiektów [5, 16, 17, 48, 84, 97, 105]. Prowadzone w pracy analizy zjawisk falowych oparto na następujących założeniach upraszczających:

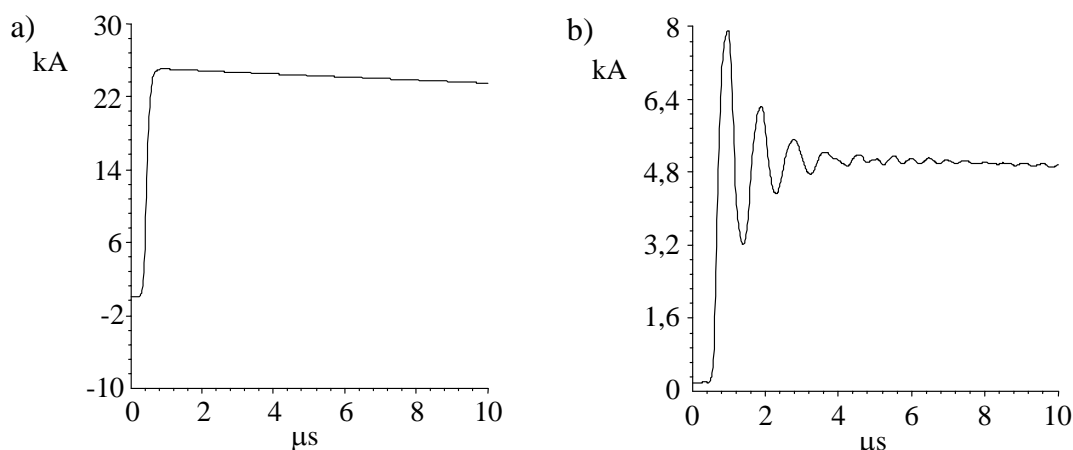
- prędkość rozchodzenia się fal zarówno w wieży jak i w kanale wyładowania jest równa prędkości światła;
- nie uwzględnia się odbić fal prądowych od szczytu kanału wyładowania.

Założenia te uzasadniają z jednej strony wyniki obserwacji rzeczywistych prądów wyładowań w obiekty [16, 17, 18, 48, 84, 97, 105], z drugiej konieczność uproszczenia analiz numerycznych podyktowaną możliwościami obliczeniowymi.

Przedstawione analizy dotyczą w głównej mierze wyładowań następnych. W takim przypadku, ze względu na krótki czas narastania czoła prądu u podstawy kanału wyładowania ($0,25 \mu\text{s}$) w stosunku do czasu potrzebnego na pokonanie przez falę drogi wzdłuż wieży (ok. $0,4 \mu\text{s}$ tam i z powrotem), efekty zjawisk falowych zachodzących w wieży są istotne z punktu widzenia kształtów i wartości prądów rozprzyskujących się w obiekcie.

W celu przedstawienia zachodzących zjawisk, podobnie jak w przypadku pierwszego wyładowania głównego, wstępnie przyjęto zewnętrzne źródło prądu umieszczone w punkcie uderzenia pioruna (na jednym ze zwodów pionowych na wieży). Ze źródła w konstrukcję wieży wpływał prąd opisany równaniem (2.2) o kształcie i parametrach charakterystycznych dla wyładowania następnego [127, 133], o wartości szczytowej 25 kA.

Przy takiej reprezentacji wyładowania otrzymano nierzeczywiste przebiegi prądów rozprzyskujących się w stacji. Na rysunku 7.13 przedstawiono przykładowe przebiegi prądów płynących w zwodzie pionowym na wieży oraz w przewodzie uziemiającym jednego ze słupów wsporczych u podstawy wieży, wyznaczone numerycznie dla modelu nr (1) stacji.



Rys. 7.13. Przebiegi prądów: a) w zwodzie pionowym na wieży; b) w przewodzie uziemiającym jednego ze słupów wsporczych u podstawy wieży; (model nr (1), zewnętrzne źródło prądu $0,25/100 \mu\text{s}$, 25 kA dołączone do zwodu pionowego na wieży)

Przebiegi prądów płynących w elementach znajdujących się nisko nad powierzchnią ziemi oraz rozplywających się w stacji charakteryzują się obecnością oscylacji o znacznych amplitudach (rys. 7.13 b)) [63, 75, 81], które są wynikiem zjawisk falowych zachodzących w wieży. Kształty prądów piorunowych rejestrowanych w naturalnych warunkach u podstaw wysokich wież nie wykazują oscylacji podobnych do przedstawionych na rys. 7.13 b), natomiast kształty prądów rejestrowanych w wierzchołkach wież zwykle charakteryzują się wyraźną obecnością składowych odbitych [16, 18, 48, 84, 97, 105].

Przyczyną otrzymania nierzeczywistych przebiegów prądów, jest nieuwzględnienie w przyjętym modelu obecności kanału wyładowania. Dołączone do wieży zewnętrzne źródło prądu, posiada z założenia (rozdział 6.1) cechy źródła idealnego: określona wartość prądu wpływającego do wieży, nieskończenie wielka wartość impedancji wewnętrznej. Zatem fala docierająca do oraz odbita od źródła prądu charakteryzują się tą samą wartością szczytową (współczynnik odbicia w wierzchołku wieży równy -1) i znoszą się wzajemnie tuż przy źródle. W konsekwencji przebieg prądu płynącego w wierzchołku wieży jest niezniekształcony przez zjawiska falowe zachodzące w wieży (rys. 7.13 a)).

Należy zauważyć, że podobny problem wystąpi także w przypadku modelu wyładowania o określonym rozkładzie prądu wzdłuż kanału, uzyskiwanym przez zastosowanie wielu idealnych źródeł prądu (znoszenie się fal docierających do oraz odbitych od źródła). Reprezentacja taka została w pracy odrzucona (rozdział 2.3).

Model wyładowania w postaci kilkukilometrowego przewodu o odpowiednich wymiarach i właściwościach elektrycznych, pobudzanego na szczycie z zewnętrznego źródła prądu, został również odrzucony, jako wymagający zbyt dużych nakładów obliczeniowych oraz wprowadzający istotne tłumienie oraz odkształcenie przebiegu prądu docierającego do podstawy kanału, w stosunku do przebiegu prądu źródła u szczytu kanału. Obserwowane w takim przypadku zmiany kształtu prądu mają ponadto charakter istotnie różny w stosunku do tych opierających się na wynikach obserwacji naturalnych wyładowań piorunowych i/lub postulowanych przez tzw. inżynierskie modele wyładowania [21, 34, 114]. W modelach tych tłumienie i odkształcenie prądu pioruna w kanale albo nie występuje wcale albo postępuje w odwrotnym kierunku, tzn. w miarę przemieszczania się wyładowania w górę kanału. Warto także zauważyć, że w takim przypadku problem odbić od nieskończenie wielkiej impedancji źródła prądu nadal pozostaje, lecz jest odsunięty w czasie (fala odbita od źródła pojawia się w wierzchołku wieży po czasie odpowiadającym dwukrotnemu jej przejściu wzdłuż kanału).

Biorąc pod uwagę powyższe fakty, zaproponowano model wyładowania, w którym zewnętrzne źródło prądu umieszczone jest w punkcie uderzenia pioruna na wieży lub na szczycie struktury reprezentującej dolną część kanału wyładowania. Uwzględnienie w modelu tylko dolnej części kanału stanowi kompromis pomiędzy możliwościami modelowania rzeczywistych efektów oddziaływań kanału wyładowania a nakładami obliczeniowymi. W takim układzie, źródło zewnętrzne wytwarza prąd o odpowiednio zmodyfikowanym kształcie i wartości, co umożliwia:

- kompensację odbić fal prądowych od tego źródła;
- uwzględnienie obecności kanału i/lub jego impedancji falowej w modelu wyładowania.

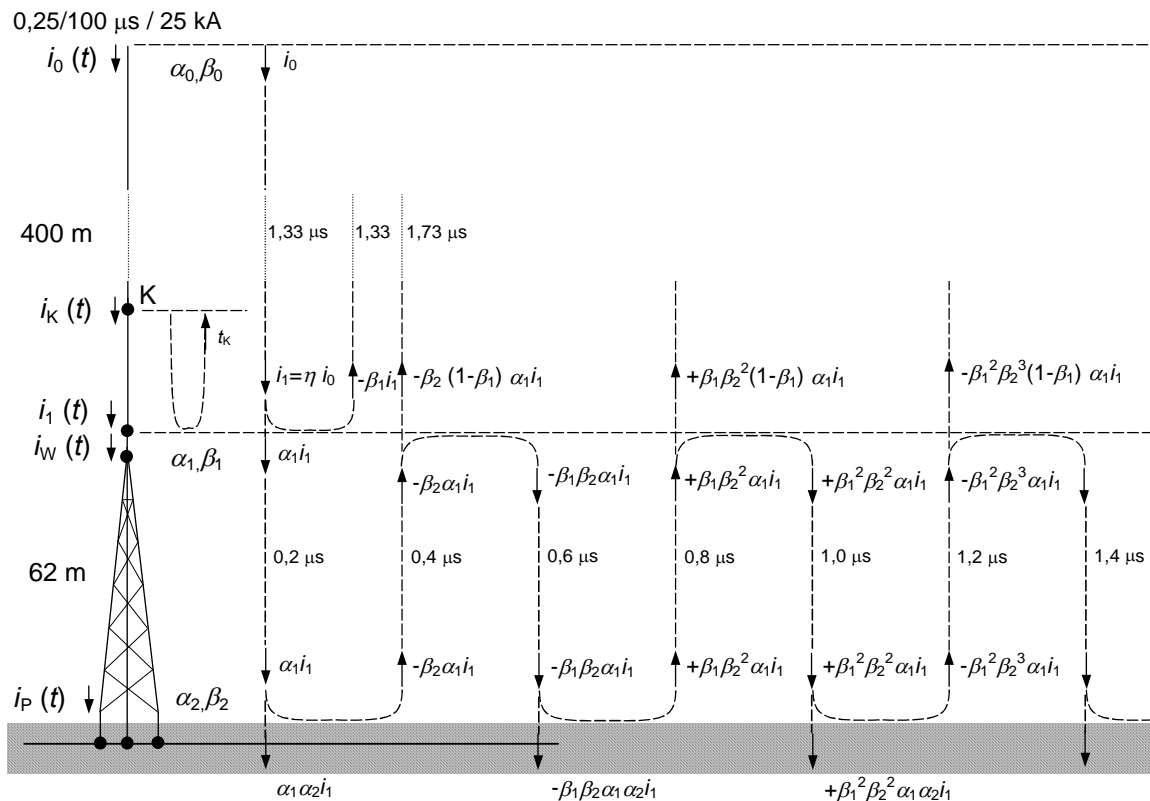
Modyfikacja przebiegu prądu źródła powinna być dokonana odpowiednio do opóźnień i wartości szczytowych docierających do źródła fal odbitych od punktów nieciągłości impedancji wieża-uziom oraz wieża-kanał wyładowania, dla występującego w rzeczywistości przypadku układu badany obiekt-kanał wyładowania. Przeprowadzenie modyfikacji wymaga jednak wcześniejszego określenia wartości współczynników odbicia na granicy wieża-uziom oraz wieża-kanał wyładowania.

W dalszej części pracy szczegółowo analizowany jest przypadek zewnętrznego źródła prądu z modyfikacją przebiegu prądu, umieszczonego w wierzchołku wieży.

W celu wyznaczenia wartości współczynników odbicia, przeprowadzono wstępne obliczenia numeryczne. W obliczeniach tych uwzględniono obecność w modelu dolnej części kanału wyładowania, którą reprezentowano pionowym, prostoliniowym przewodem dołączonym w punkcie uderzenia pioruna do wieży i pobudzonym na szczycie z zewnętrznego źródła prądu [78]. Długość modelowanej części kanału starano się dobrać w taki sposób, aby opóźnić moment pojawienia się w wierzchołku wieży fali odbitej od źródła prądu na szczycie poza zakres czasu, w którym obserwuje się kilka pierwszych, najbardziej istotnych odbić fal rozchodzących się w samej wieży. Z drugiej strony, modelowana część kanału powinna być na tyle krótka, aby zminimalizować nakłady obliczeniowe oraz zniekształcenie/tłumienie prądu przewodzenia (tzw. prądu wzdłużnego – ang. longitudinal current) fali padającej ze źródła docierającej do podstawy kanału.

Obliczenia prowadzono dla kanału o długości 400 m. W takim przypadku czas przebiegu fali od podstawy kanału w górę i z powrotem (ok. $2,7 \mu\text{s}$) jest prawie siedmiokrotnie dłuższy niż z czas propagacji fali wzdłuż wieży od góry do dołu i z powrotem ($0,4 \mu\text{s}$). Przyjęta długość kanału jest więc wystarczająca do tego, aby przed dojściem do wierzchołka wieży pierwszej fali odbitej od źródła prądu zdążyły zaniknąć procesy przejściowe związane z odbiciami fal rozchodzących się w wieży (uwzględnienie ok. sześciu kolejnych odbić od wierzchołka wieży oraz od uziomu – rys. 7.13 b)).

W przyjętym modelu numerycznym kanał wyładowania zastąpiono cylindrycznym przewodem o średnicy 2 cm i stałej wartości rezystywności na całej jego długości. Na podstawie analiz dostępnych danych literaturowych [2, 98, 114], dotyczących m.in. właściwości fizycznych plazmy w kanale wyładowania piorunowego, przyjęto rezystywność kanału równą ok. $4,54 \cdot 10^{-5} \Omega\text{m}$. Na szczycie przewodu reprezentującego kanał wyładowania umieszczono źródło prądu o kształcie odpowiadającym następnemu wyładowaniu głównemu (rozdział 2). Drugi koniec przewodu dołączono do zwodu pionowego na wieży (rys. 7.14).



Rys. 7.14. Ilustracja zjawisk falowych zachodzących w układzie wieża-kanał wyładowania dla przypadku wyładowania następnego

W rozważaniach przyjęto następujące oznaczenia:

- $\beta_1, \beta_2, \beta_0$ – współczynniki odbicia w punktach nieciągłości impedancji odpowiednio kanał-wieża, wieża-uziom oraz kanał-źródło prądu (wartości bezwzględne);
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_0$ – współczynniki przepuszczania w punktach nieciągłości impedancji odpowiednio kanał-wieża, wieża-uziom oraz kanał-źródło prądu.

Należy zaznaczyć, że współczynnik odbicia na granicy wieża-uziom w ogólnym przypadku zależy od miejsca obserwacji (przy więcej niż jednym elemencie łączącym wieżę z uziosem). W pracy zmienna β_2 jest rozumiana jako całkowity współczynnik odbicia na granicy wieża-uziom widziany z perspektywy wierzchołka wieży, tzn. związany z całkowitym prądem spływającym z wieży do uziołu.

Przeanalizowano przebiegi prądów w wierzchołku wieży oraz w różnych punktach K kanału wyładowania. W rozważaniach teoretycznych założono, że tłumienie/zniekształcenie prądu przewodzenia wzdłuż wieży można pominąć ze względu na niewielką wysokość wieży, dobrą przewodność jej konstrukcji w porównaniu z przewodnością kanału wyładowania oraz znaczną odległość wieży od źródła prądu. Założono również, że punkt K kanału znajduje się wystarczająco nisko nad wieżą tak, by można było pominąć także tłumienie/zniekształcenie prądu przewodzenia dla fal odbitych od wierzchołka i podstawy wieży wędrujących na odcinku wieża-punkt K. W związku z tym przyjęto następujące oznaczenia składowych prądów:

- $i_0(t)$ przebieg prądu źródła zewnętrznego na szczycie 400 m kanału, o kształcie $0,25/100 \mu\text{s}$ i wartości szczytowej 25 kA;
- $i_1(t)$ fala padająca prądu w kanale wyładowania tuż nad wieżą (wytłumiony i opóźniony o ok. $1,33 \mu\text{s}$ przebieg prądu źródła $i_0(t)$);
- $\alpha_1 i_1(t)$ fala przepuszczona do wierzchołka wieży (zwołu pionowego);
- $i_K(t)$ całkowity prąd w punkcie K kanału wyładowania, będący złożeniem fali padającej w punkcie K kanału $i_{K0}(t)$ (odpowiednio opóźniony i wytłumiony przebieg prądu źródła $i_0(t)$) oraz odpowiednio opóźnionych kolejnych fal odbitych;
- $i_W(t)$ całkowity prąd w wierzchołku wieży (zwodzie pionowym), będący złożeniem fali przepuszczonej do wierzchołka wieży $\alpha_1 i_1(t)$ oraz odpowiednio opóźnionych kolejnych fal odbitych;
- $i_P(t)$ całkowity prąd u podstawy wieży (sumaryczny prąd spływający z wieży do uziołu), będący złożeniem opóźnionej o ok. $0,2 \mu\text{s}$ fali przepuszczonej do wierzchołka wieży $\alpha_1 i_1(t)$ oraz odpowiednio opóźnionych kolejnych fal odbitych.

Zgodnie z założeniami przedstawionymi na wstępie tego rozdziału, w rozważaniach teoretycznych przyjęto $\beta_0 = 0$ (brak odbicia na szczycie kanału lub na szczycie modelowanej części kanału). Analizując wyniki obliczeń numerycznych dla rozważanego przypadku (rys. 7.14), należy jednak pamiętać o występowaniu odbicia od źródła prądu, $\beta_0 = 1$.

Uwzględniając kilka pierwszych odbić fal prądowych od uziołu oraz wierzchołka wieży, poszczególne przebiegi prądów w wierzchołku wieży $i_W(t)$, u podstawy wieży $i_P(t)$ oraz w punkcie K kanału wyładowania $i_K(t)$ wynoszą:

$$i_W(t) = \alpha_1 \cdot i_1(t) + k \cdot \alpha_1 \cdot i_1(t-0,4) + s \cdot k \cdot \alpha_1 \cdot i_1(t-0,8) + s^2 \cdot k \cdot \alpha_1 \cdot i_1(t-1,2) + \\ + s^3 \cdot k \cdot \alpha_1 \cdot i_1(t-1,6) + s^4 \cdot k \cdot \alpha_1 \cdot i_1(t-2) + s^5 \cdot k \cdot \alpha_1 \cdot i_1(t-2,4) + \dots \quad (7.1)$$

$$i_P(t) = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot i_1(t-0,2) + s \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot i_1(t-0,6) + s^2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot i_1(t-1) + \\ + s^3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot i_1(t-1,4) + s^4 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot i_1(t-1,8) + s^5 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot i_1(t-2,2) + \\ + s^6 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot i_1(t-2,6) + \dots \quad (7.2)$$

$$i_K(t) = i_{K0}(t) + \beta_1 \cdot i_{K0}(t-t_K) + (1 + \beta_1) \cdot k \cdot i_{K0}(t-t_K-0,4) + \\ + (1 + \beta_1) \cdot k \cdot s \cdot i_{K0}(t-t_K-0,8) + \dots \quad (7.3)$$

gdzie:

$$k = (1 - \beta_1) \cdot \beta_2 \quad (7.4)$$

$$s = -\beta_1 \cdot \beta_2 \quad (7.5)$$

$i_1(t - 0,2), i_1(t - 0,4), i_1(t - 0,6), \dots$ – odpowiednio opóźnione (w μs) przebiegi fali padającej $i_1(t)$ w wierzchołku wieży;

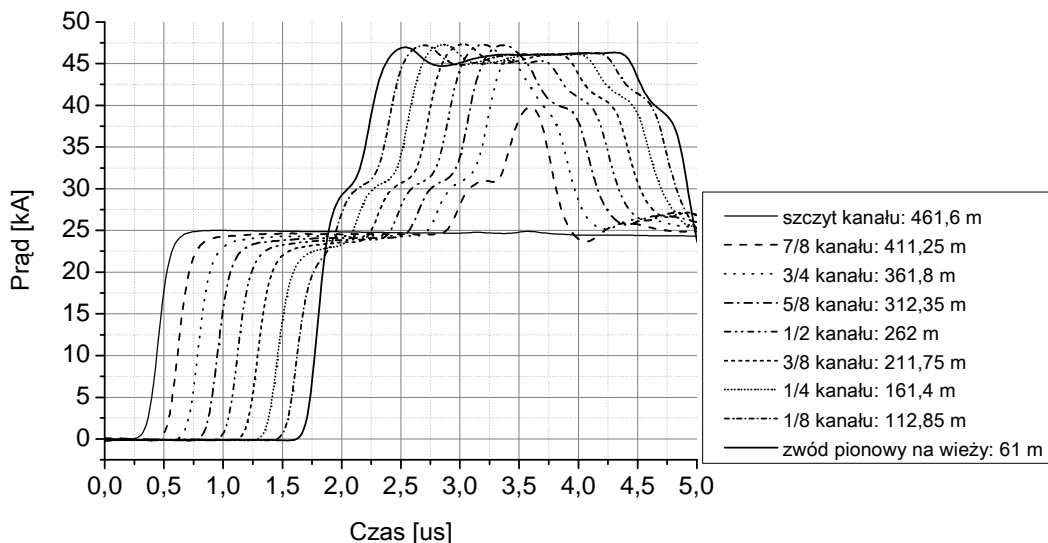
$i_{K0}(t - t_K), i_{K0}(t - t_K - 0,4), \dots$ – odpowiednio opóźnione przebiegi fali padającej w określonym punkcie K kanału $i_{K0}(t)$;

t_K – czas odpowiadający przejściu fali od punktu K kanału do wierzchołka wieży i z powrotem do punktu K;

0,2 μs – czas odpowiadający przejściu fali od wierzchołka wieży do uziomu.

Wyznaczone numerycznie w programie HIFREQ przebiegi prądów w wierzchołku wieży $i_w(t)$ i w kanale wyładowania $i_K(t)$ oraz przedstawione wyżej zależności (7.1) – (7.5), wykorzystano do wyznaczenia wartości współczynników odbicia na granicy wieża-kanał wyładowania oraz wieża-uziom.

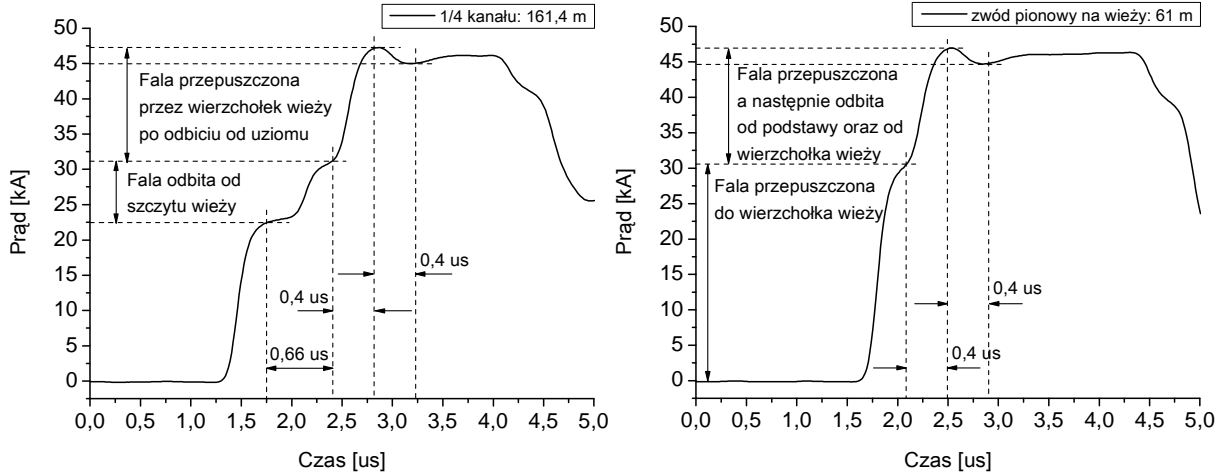
Otrzymane przebiegi prądów w wierzchołku wieży oraz w różnych miejscach wzdłuż kanału wyładowania dla modelu nr (3) stacji przedstawiono na rys. 7.15.



Rys. 7.15. Przebiegi prądów w wierzchołku wieży oraz w różnych punktach wzdłuż 400 m kanału wyładowania wyznaczone numerycznie dla modelu nr (3) stacji bazowej

Do wyznaczenia wartości współczynników odbicia β_1 oraz β_2 można wykorzystać jeden z przebiegów prądu w kanale wyładowania lub w zwodzie pionowym na wieży, dla którego „dobrze rozpoznawalne” są momenty pojawienia się oraz wartości szczytowe trzech pierwszych składowych prądu występujących we wzorach (7.3) lub (7.1). Można posłużyć się też odpowiednio wybranymi dwoma z takich przebiegów. Poglądowo sposób wyznaczenia wartości współczynników odbicia na podstawie znajomości otrzymanych numerycznie przebiegów prądów płynących w 1/4 kanału wyładowania oraz w wierzchołku wieży (w zwodzie pionowym) przedstawiono na rys. 7.16.

Różne sposoby wyznaczenia wartości współczynników odbicia na podstawie znajomości przebiegów prądów płynących w kanale wyładowania i/lub w wierzchołku wieży dla rozważanego przypadku (rys. 7.15), przeanalizowano bardziej szczegółowo poniżej.



Rys. 7.16. Wyznaczone numerycznie przebiegi prądów: a) w 1/4 kanału wyładowania (161,4 m nad ziemią); b) w wierzchołku wieży (61 m nad ziemią); model nr (3)

Do wyznaczenia obu współczynników odbicia wystarczy znajomość wartości fali padającej w danym punkcie K kanału oraz pierwszych dwu składowych odbitych. Po dokładnej analizie przyjęto, że najbardziej wiarygodne informacje dotyczące momentów nakładania się kolejnych fal odbitych można uzyskać z przebiegów prądów otrzymanych na wysokościach 1/4, 3/8, 1/2 lub 5/8 kanału. W tych punktach, na podstawie wzoru (7.3) otrzymujemy:

$$1 + \beta_1 = \frac{i_K(t_R + t_K)}{i_K(t_R)} \quad (7.6)$$

$$(1 + \beta_1) \cdot (1 + k) = \frac{i_K(t_R + t_K + 0,4)}{i_K(t_R)} \quad (7.7)$$

gdzie:

t_R – czas, po którym fala padająca prądu $i_{K0}(t)$ w punkcie K kanału osiąga w przybliżeniu wartość maksymalną;

$i_K(t_R)$, $i_K(t_R + t_K)$, $i_K(t_R + t_K + 0,4)$ – wartości chwilowe prądu w punkcie K kanału, występujące po osiągnięciu w przybliżeniu wartości maksymalnej odpowiednio przez falę padającą, pierwszą składową odbitą (fala odbita od szczytu wieży) oraz drugą składową odbitą (pierwsza fala odbita od uziomu i przepuszczona przez wierzchołek wieży).

W rzeczywistych warunkach podczas naturalnych lub prowokowanych wyładowań piorunowych rejestrowane są prądy płynące w wierzchołkach lub u podstaw wież. Uwzględniając ten fakt przeanalizowano również przebieg prądu płynącego w wierzchołku wieży $i_W(t)$.

W tym przypadku, wartość fali padającej prądu $i_1(t)$ nie jest znana, z uwagi na tłumienie, jakiemu podlega fala padająca prądu poruszająca się wzdłuż kanału wyładowania (rys. 7.15) oraz brak opóźnienia fali odbitej w wierzchołku wieży w stosunku do fali padającej. Pierwsza składowa przedstawia więc falę przepuszczoną do wierzchołka wieży. Wykorzystując znajomość wartości fali przepuszczonej oraz dwu kolejnych składowych odbitych (rys. 7.15), na podstawie wzoru (7.1) otrzymuje się:

$$1 + k = \frac{i_W(t_R + 0,4)}{i_W(t_R)} \quad (7.8)$$

$$1 + k + s \cdot k = \frac{i_W(t_R + 0,8)}{i_W(t_R)} \quad (7.9)$$

gdzie:

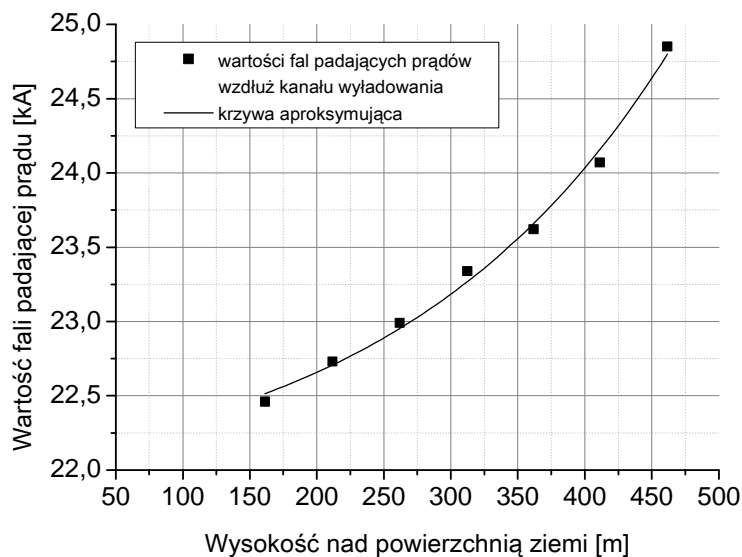
t_R – czas, po którym fala przepuszczona osiąga w przybliżeniu wartość maksymalną;
 $i_W(t_R)$, $i_W(t_R+0,4)$, $i_W(t_R+0,8)$ – wartości chwilowe prądu w wierzchołku wieży, występujące po osiągnięciu w przybliżeniu wartości maksymalnej odpowiednio przez falę przepuszczoną do wierzchołka wieży, pierwszą składową odbitą (złożenie pierwszej fali odbitej od uziomu i drugiej fali odbitej od wierzchołka wieży) oraz drugą składową odbitą (złożenie drugiej fali odbitej od uziomu i trzeciej fali odbitej od wierzchołka wieży).

Wykorzystanie równania (7.9) wymaga znajomości wartości prądu w wierzchołku wieży po nałożeniu się drugiej składowej odbitej $i_W(t_R+0,8)$ (pierwsze minimum w przebiegu prądu w zwodzie pionowym na wieży). Ponieważ druga składowa odbita charakteryzuje się stosunkowo małą wartością (rys. 7.15), dokładność wyznaczenia współczynnika $1+k+sk$ na podstawie równania (7.9) może budzić wątpliwości. Uwzględniając ten fakt, w celach weryfikacji, przeanalizowano dodatkowo przypadek, w którym w miejsce równania (7.9) posłużono się zależnością wynikającą bezpośrednio z pierwszego członu równania (7.1):

$$1 + \beta_1 = \frac{i_W(t_R)}{i_1(t_R)} \quad (7.10)$$

W zależności tej nieznaną wartość fali padającej prądu tuż nad wieżą $i_1(t_R)$ wyznaczono analizując tłumienie fali padającej prądu $i_{K0}(t_R)$ wzdłuż kanału wyładowania (rys. 7.15). Zależność wartości fali padającej prądu $i_{K0}(t_R)$, w funkcji wysokości punktu obserwacji K w kanale nad powierzchnią ziemi aproksymowano krzywą wykładniczą (rys. 7.17).

W wyniku wykładniczej ekstrapolacji, otrzymano wartość fali padającej prądu tuż nad wieżą $i_1(t_R)$ (62 m nad powierzchnią ziemi) równą ok. 22,3 kA.



Rys. 7.17. Zależność wartości fali padającej prądu wzdłuż kanału wyładowania od wysokości punktu obserwacji K w kanale nad powierzchnią ziemi (rys. 7.15)

W tabelicy 7.3 zestawiono wartości współczynników występujących w równaniach (7.4) – (7.10) otrzymane na podstawie analiz wartości:

- fali padającej oraz pierwszych dwu składowych odbitych w przebiegach prądów w różnych punktach K kanału wyładowania (równania (7.6) i (7.7)): wiersze 1 - 4;
- fali przepuszczonej oraz dwu kolejnych składowych odbitych w przebiegu prądu w wierzchołku wieży (równania (7.8) i (7.9)): wiersz 5;

- fali przepuszczonej i kolejnej składowej odbitej w przebiegu prądu w wierzchołku wieży, oraz fali padającej prądu tuż nad wieżą otrzymanej w wyniku ekstrapolacji wartości fali padającej wzdłuż kanału wyładowania (równania (7.8) i (7.10): wiersz 6.

Tablica 7.3. Wartości współczynników występujących w równaniach (7.4) – (7.10), charakteryzujące zjawiska falowe zachodzące w układzie wieża-kanał wyładowania

Lp.	Analizowany (e) punkt (y) obserwacji	$1+\beta_1$	$(1+\beta_1)(1+k)$	$1+k$	$1+k+sk$	k	β_1	β_2
1.	5/8 kanału	1,35	2,02	-	-	0,51	0,35	0,78
2.	1/2 kanału	1,37	2,06	-	-	0,50	0,37	0,79
3.	3/8 kanału	1,38	2,08	-	-	0,51	0,38	0,82
4.	1/4 kanału	1,39	2,11	-	-	0,52	0,39	0,85
5.	zwód pionowy	-	-	1,53	1,46	0,53	0,20	0,66
6.	zwód pionowy oraz fale padające wzdłuż kanału (rys. 7.17)	1,37	-	1,53	-	0,53	0,37	0,84

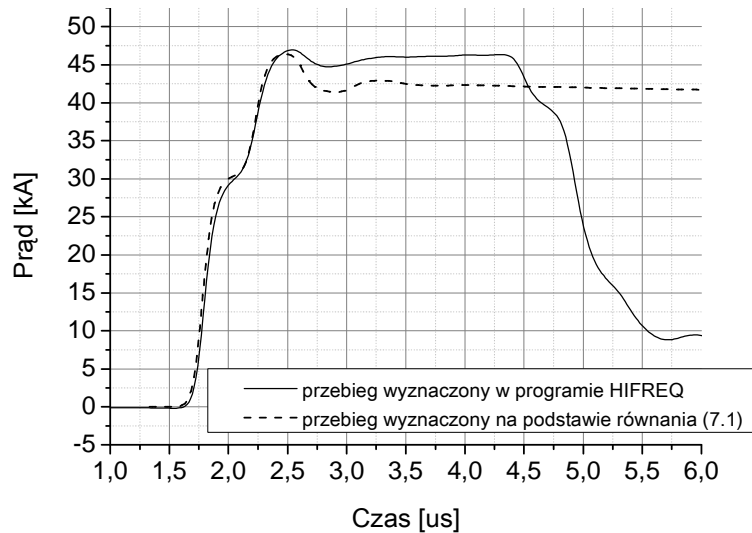
Wartości współczynników odbicia β_1 i β_2 wyznaczone przy użyciu równania (7.9) (wiersz 5, tablica 7.3) należy uznać za obarczone dużym błędem, ponieważ wartość fali padającej w wierzchołku wieży (przy uwzględnieniu wartości fali przepuszczonej równej 30,59 kA; rys. 7.16) musiałaby być w takim przypadku równa: $30,59 \text{ kA} / (1+0,2) = 25,5 \text{ kA}$. Jest to więc wartość większa niż wartość fali padającej prądu na szczycie kanału. Źródłem błędu wyznaczenia wartości współczynnika $1+k+sk$ z przebiegu prądu w wierzchołku wieży jest nieuwzględnienie w zależnościach teoretycznych (7.1) – (7.10) odkształceń prądów będących prawdopodobnie wynikiem sprzężeń elektromagnetycznych [8]. Odkształcenia te objawiają się niewielkim wzrostem prądów dla zakresów czasu począwszy od wystąpienia maksimum prądu do pojawienia się fali odbitej od źródła prądu (rys. 7.15). Dodatkowe obliczenia pokazały, że odkształcenia te są tym większe im większa jest rezystywność kanału.

Wartości współczynników odbicia β_1 i β_2 wyznaczone na podstawie analiz przebiegów prądów w różnych punktach K kanału, wykazują tendencję wzrostową w miarę przesuwania się z punktem K w dół kanału (wiersze 1 – 4, tablica 7.3). Jest to wynikiem nieuwzględnienia we wzorze (7.3) tłumienia prądów kolejnych fal odbitych, które pojawiają się w punkcie K kanału po przebyciu drogi od punktu K do wieży i z powrotem. Tłumienie to jest tym mniejsze im krótszą drogę mają do pokonania kolejne fale odbite, można więc oczekiwać, że błąd oszacowania wartości współczynników odbicia jest najmniejszy dla punktów K kanału znajdujących się nisko nad wieżą.

Potwierdzenie poprawności wyników otrzymanych na podstawie analiz przebiegów prądów w poszczególnych punktach K kanału (wiersze 1 – 4, tablica 7.3), stanowią wartości współczynników odbicia β_1 i β_2 wyznaczone przy wykorzystaniu znajomości wartości fali przepuszczonej oraz kolejnej składowej odbitej prądu w wierzchołku wieży, uzupełnionych analizą wartości fal padających prądu wzdłuż kanału wyładowania (wiersz 6, tablica 7.3). Otrzymane w tym przypadku wartości współczynników odbicia są zbliżone do uzyskanych w wyniku analiz przebiegów prądów w poszczególnych punktach K kanału znajdujących się wystarczająco nisko nad wieżą (mniej więcej od połowy długości kanału). Można więc oczekiwać, że obserwowane zniekształcenia prądów, nie występują lub są pomijalnie małe dla zakresów czasu przed wystąpieniem pierwszych minimów w przebiegach prądów (rys. 7.15).

Na podstawie porównania przebiegu prądu w wierzchołku wieży otrzymanego numerycznie w programie HIFREQ z przebiegami wyznaczonymi z zależności (7.1) dla otrzymana-

nych wartości współczynników odbicia (tablica 7.3), wybrano ostatecznie optymalne ich wartości: $\beta_1 = 0,38$ oraz $\beta_2 = 0,85$ dla $k = 0,53$ (rys. 7.18). Dla tych wartości przebieg prądu wyznaczony z zależności (7.1) jest najbardziej zbliżony do przebiegu otrzymanego z obliczeń w programie HIFREQ (dla czasu $t < 4,3 \mu\text{s}$, tj. przed nadejściem fali odbitej od źródła prądu).



Rys. 7.18. Przebiegi prądu w wierzchołku wieży: obliczony w programie HIFREQ oraz wyznaczony z równania (7.1) przy $\beta_1 = 0,38$ oraz $\beta_2 = 0,85$

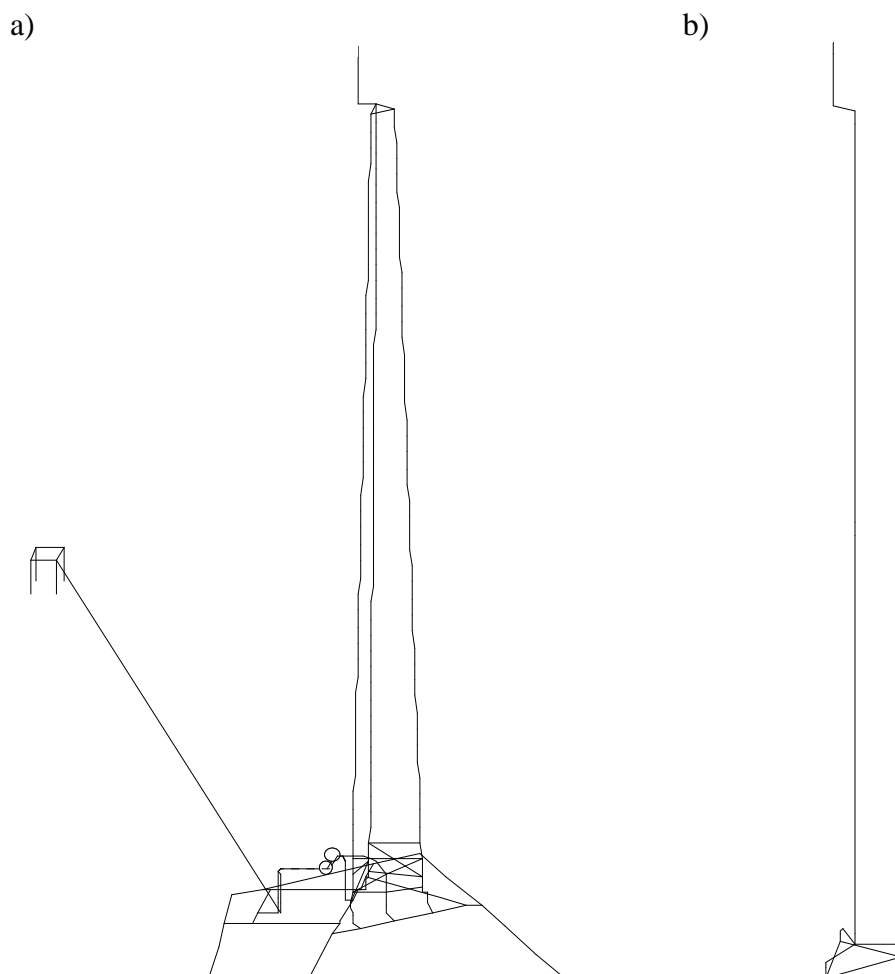
Należy zauważyć, że zależność (7.1) nawet dla wartości optymalnych nie odwzorowuje dokładnie kształtu prądu wyznaczonego numerycznie w zakresie czasu począwszy od osiągnięcia maksimum prądu (ok. $2,5 \mu\text{s}$) do pojawienia się fali odbitej od źródła prądu (ok. $4,3 \mu\text{s}$). Jest to wynikiem nieuwzględnienia w zależnościach (7.1), (7.2) i (7.3) wszystkich zachodzących zjawisk elektromagnetycznych. Równania te otrzymano przy założeniu, że fala rozchodzi się w układzie wieża-kanal wyładowania jak w bezstratnej linii transmisyjnej. Program HIFREQ uwzględnia zachodzące zjawiska w znacznie szerszym aspekcie, czego efektem są wspomniane odkształcenia impulsu prądu w miarę jego przemieszczania się wzdłuż przewodów modelowanej struktury. Podobne zjawiska, „spłaszczenia” części szczytowej bez zasadniczej zmiany czasu czoła, obserwowano w przebiegach prądów wyznaczonych dla pierwszego wyładowania głównego (rozdział 7.1). W ogólnym przypadku może to być powodem błędów wyznaczenia wartości współczynników odbicia (wiersz 5, tablica 7.3).

W celu przeanalizowania wpływu elementów konstrukcji i instalacji stacji na wartości współczynników odbicia, podobne obliczenia wykonano dodatkowo dla dwóch prostych modeli stacji bazowej, charakteryzujących się różnym stopniem uproszczenia elementów konstrukcji i instalacji wieży oraz uziomu w stosunku do modelu nr (3) (rys. 7.11):

- **model nr (3c)** – model nr (3), w którym usunięto kabel antenowy i drabinkę kablową wzdłuż wieży, uziomy otokowe wokół stóp fundamentowych i zbrojenie fundamentów wieży, zbrojenie kontenera i okablowanie w kontenerze oraz uproszczono system wyrównywania potencjałów w kontenerze do pojedynczego przewodu łączącego szyny uziemiające (rys. 7.19 a));
- **model nr (3d)** – model, w którym wieżę zastąpiono pojedynczym przewodem, a uziom miał kształt trójkątnego otoku (rys. 7.19 b)).

Obliczenia prowadzono dla tego samego dwuwarstwowego modelu gruntu $260/1060 \Omega\text{m}$.

W tablicy 7.4 zestawiono otrzymane wartości współczynników odbicia oraz odpowiadających im: impedancji falowej wieży i impedancji zastępczej uziomu jako funkcji impedancji falowej kanału wyładowania Z dla wszystkich trzech rozważanych modeli stacji [77].



Rys. 7.19. Proste modele stacji bazowej, w których analizowano zjawiska falowe: a) **model nr (3c)**; b) **model nr (3d)**

Tablica 7.4. Wartości współczynników odbicia β_1 i β_2 oraz odpowiadających im impedancji falowej wieży i impedancji zastępczej uziomu dla różnych modeli stacji bazowej

Model stacji bazowej	Współczynnik odbicia		Impedancje wieży oraz uziomu jako funkcja impedancji falowej kanału wyładowania Z	
	β_1	β_2	wieży	uziomu
Model nr (3)	0,38	0,85	$0,45 \cdot Z$	$0,04 \cdot Z$
Model nr (3c)	0,28	0,83	$0,56 \cdot Z$	$0,05 \cdot Z$
Model nr (3d)	0,15	0,85	$0,74 \cdot Z$	$0,06 \cdot Z$

Wartości współczynnika odbicia β_1 na granicy wieża-kanał wyładowania wykazują wyraźne różnice w zależności od stopnia odwzorowania w modelu instalacji kablowych oraz elementów konstrukcyjnych wieży. Dwukrotne zwiększenie wartości współczynnika odbicia β_1 wystąpiło po zastosowaniu trzech przewodów reprezentujących konstrukcję wieży (model nr (3c)) zamiast jednego (model nr (3d)). Dalszy znaczący wzrost współczynnika odbicia β_1 zaobserwowano po dodaniu jeszcze dwóch przewodów reprezentujących konstrukcję drabinki wieży i ekran kabla antenowego oraz rozbudowaniu konstrukcji i instalacji kontenera (model nr (3)). Może to oznaczać, że wartość współczynnika odbicia na granicy wieża-kanał wyładowania

dowania będzie wyraźnie większa dla modelu uwzględniającego także elementy ukośne kratownicy wieży. Wartości współczynnika odbicia β_2 na granicy wieża-uziom dla wszystkich analizowanych modeli są do siebie zbliżone.

Obserwuje się wyraźną tendencję do zmniejszania się impedancji falowej wieży oraz impedancji zastępczej uziomu w miarę rozbudowywania modelu stacji o dodatkowe elementy. Impedancja falowa wieży zmienia się w podobnym stopniu, co współczynnik odbicia β_1 (stała wartość impedancji falowej kanału). Nieproporcjonalna zależność pomiędzy wartością współczynnika odbicia β_2 a stosunkiem impedancji uziomu do impedancji wieży, może być związana z błędami wynikającymi z dużo mniejszej wartości impedancji zastępczej uziomu w porównaniu do impedancji falowej wieży (niskie wartości rezystywności gruntu).

W tabelicy 7.5 zestawiono wartości współczynników odbicia otrzymane dla modelu nr (3) stacji bazowej oraz wyznaczone na podstawie wyników rejestracji prądów piorunowych w wierzchołkach oraz u podstaw wież zlokalizowanych w różnych rejonach świata.

Tablica 7.5. Porównanie wartości współczynników odbicia β_1 i β_2 otrzymanych numerycznie dla modelu nr (3) oraz wyznaczonych na podstawie rejestracji prądów rzeczywistych lub prowokowanych wyładowań w wieże

Wieża	Współczynnik odbicia	
	β_1	β_2
Model nr (3)	0,38	0,85
500 m wieża „CN” w Toronto; Janischewskij i in. [45]	0,27 ÷ 0,49	0,34 ÷ 0,43
200 m wieża w Japonii; Michishita i in. [84]	0,6	0,4
160 m wieża Peissenberg w Niemczech; Fuchs [31, 18, 97]	0,39 ÷ 0,68	0,64 ÷ 0,81
160 m wieża Peissenberg w Niemczech; Beierl [16, 18, 97]	0,5	1
540 m wieża Ostankino w Moskwie; Rakov [97]	–	1

Z przedstawionego zestawienia wynika, że wyznaczone numerycznie dla modelu nr (3) wartości współczynników odbicia są zbliżone do wartości otrzymanych dla wież Peissenberg oraz Ostankino. W pozostałych przypadkach, podobne wartości otrzymano jedynie dla współczynników odbicia na granicy wieża-kanał wyładowania. Należy jednak zauważyć stosunkowo duży rozrzut wartości współczynnika odbicia na granicy wieża-kanał wyładowania obserwowany dla tych samych obiektów. Spowodowane jest to przypuszczalnie różnymi właściwościami i/lub wymiarami kanału wyładowania. Wartości współczynnika odbicia na granicy wieża-uziom dla wież w Toronto oraz w Japonii są natomiast wyraźnie mniejsze niż dla pozostałych obiektów. Przyczyną są przypuszczalnie znaczne różnice w warunkach uziemienia tych wież (różne wartości rezystywności gruntu i/lub konfiguracje uziomów).

Otrzymane w wyniku obliczeń numerycznych wartości współczynników odbicia są zbliżone do obserwowanych w naturalnych warunkach. Uwzględniając dodatkowo przedstawione wyniki analiz różnych sposobów wyznaczenia współczynników odbicia, można uznać za zadawalającą dokładność oszacowania ich wartości metodami numerycznymi.

Na początku niniejszego rozdziału stwierdzono, że w przypadku, gdy model następnego wyładowania głównego nie uwzględnia rzeczywistej impedancji falowej kanału, wyznaczone

numerycznie przebiegi prądów w wieży mogą różnić się zasadniczo w stosunku do przebiegów prądów rejestrowanych podczas naturalnych wyładowań. Właściwe uwzględnienie impedancji falowej kanału wyładowania w modelu wymaga zapewnienia zbliżonej do rzeczywistej wartości współczynnika odbicia wieża-kanał. Dodatkowo, w wyniku zachodzących zjawisk falowych kształty prądów w wierzchołku i u podstawy wieży mogą się istotnie różnić (rys. 7.13), zależnie od wartości obu współczynników odbicia wieża-kanał oraz wieża-uziom.

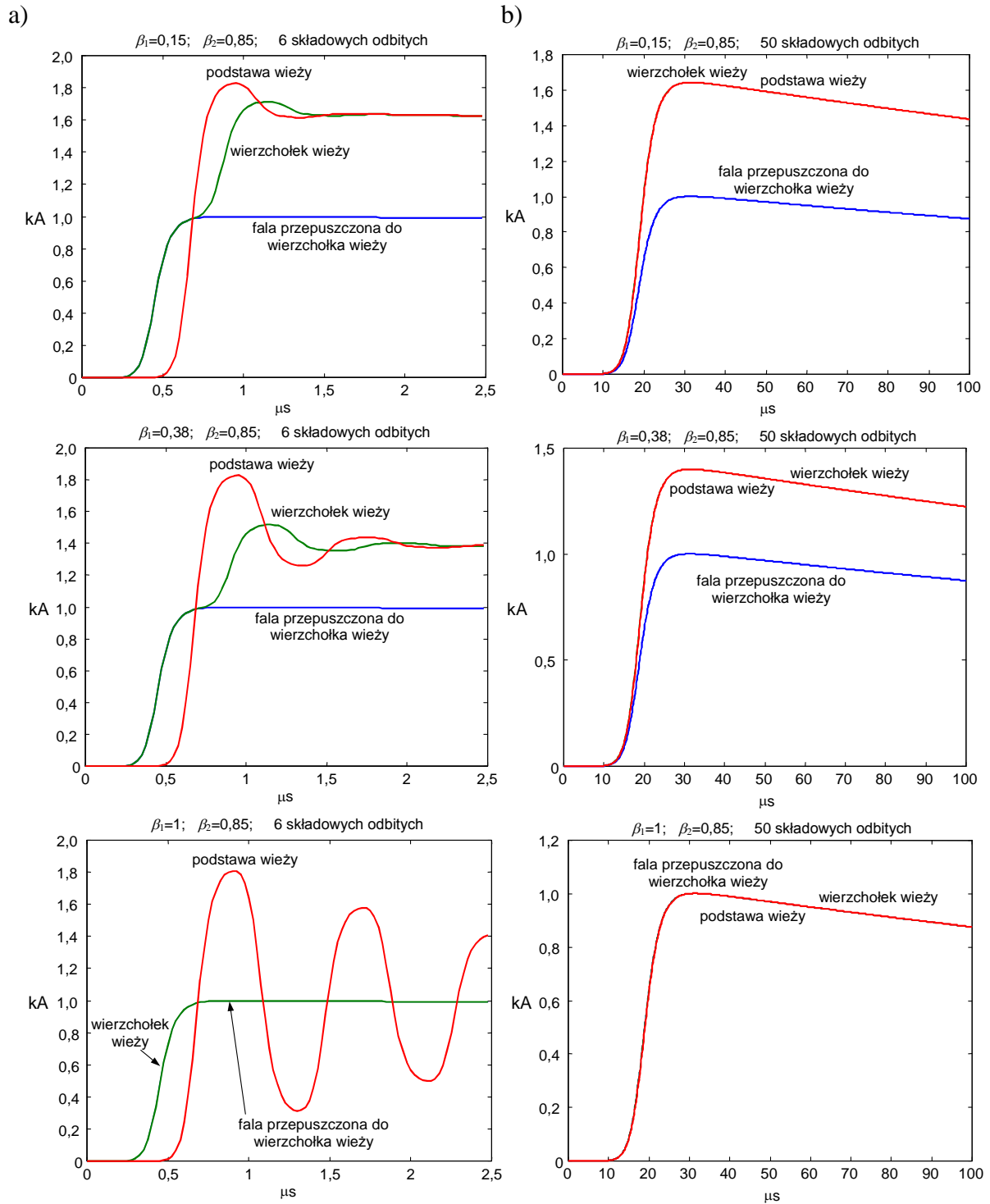
W analizach numerycznych odpowiadających pierwszemu wyładowaniu głównemu (rozdział 7.1) nie obserwowano różnic w kształtach prądów płynących w wierzchołku i u podstawy wieży (rys. 7.2). Uzasadnia to przyjęte założenie, zgodnie z którym pominięto zjawiska falowe zachodzące w wieży. Jednak nieuwzględnienie w modelu wyładowania impedancji falowej kanału, może być przyczyną błędnej interpretacji wartości szczytowych prądów w wierzchołku oraz u podstawy wieży.

W celu weryfikacji wyników obliczeń numerycznych otrzymanych dla przypadku pierwszego wyładowania głównego oraz wstępnego przybliżonego oszacowania spodziewanych kształtów prądów w wieży w przypadku wyładowań następnych, prowadzono dodatkowe rozważania teoretyczne wykorzystując wzory (7.1) i (7.2). Na rysunku 7.20 przedstawiono przebiegi fali przepuszczonej $\alpha_1 i_1(t)$ oraz całkowitych prądów w wierzchołku wieży $i_w(t)$ i u podstawy wieży $i_p(t)$, wyznaczone ze wzorów (7.1) i (7.2) dla różnych wartości współczynnika odbicia β_1 . Porównano przebiegi prądów dla pierwszego oraz następnego wyładowania głównego w przypadku, gdy do wierzchołka wieży dołączony jest kanał wyładowania o skończonej wartości impedancji falowej ($\beta_1 \neq 1$) lub idealne źródło prądu ($\beta_1 = 1$). Założono, że prąd u podstawy wieży jest sumarycznym prądem spływającym do uziomu ze wszystkich odprowadzeń oraz, że wartość szczytowa fali przepuszczonej do wierzchołka wieży wynosi 1 kA.

Przebieg prądu piorunowego u podstawy wieży dla przypadku wyładowania następnego przy założeniu, że do wierzchołka wieży dołączone jest jedynie źródło prądu ($\beta_1 = 1$), ma podobny charakter do przebiegów prądów otrzymanych numerycznie w programie HIFREQ (rys. 7.13 b)), wykazując oscylacje o stosunkowo dużej amplitudzie. Kształty przebiegów prądów otrzymane przy założeniu, że do wierzchołka wieży dołączony jest kanał wyładowania o skończonej wartości impedancji ($\beta_1 \neq 1$) mają zdecydowanie odmienny charakter.

W przypadku pierwszego wyładowania głównego, niezależnie od wartości współczynników odbicia, zarówno kształty jak i wartości szczytowe prądów w wierzchołku oraz u podstawy wieży są identyczne. Zatem prąd wprowadzany do wierzchołka wieży ze źródła pojawia się u podstawy wieży niezmienny. Jednak w przypadku, gdy $\beta_1 \neq 1$, wartości szczytowe prądów w wierzchołku oraz u podstawy wieży są większe niż wartość szczytowa fali przepuszczonej do wierzchołka wieży $\alpha_1 i_1(t)$, podczas gdy przy $\beta_1 = 1$, wszystkie trzy przebiegi charakteryzują się identyczną wartością szczytową. Oznacza to, że kształty prądów i napięć otrzymane przy $\beta_1 = 1$ (rozdział 7.1) są poprawne. Jednak przy założeniu, że wartość szczytowa fali padającej prądu u podstawy kanału pierwszego wyładowania głównego jest równa 100 kA (III poziom ochrony), wartości szczytowe otrzymanych prądów są zaniżone z powodu nieuwzględnienia rzeczywistej impedancji falowej kanału wyładowania w modelu.

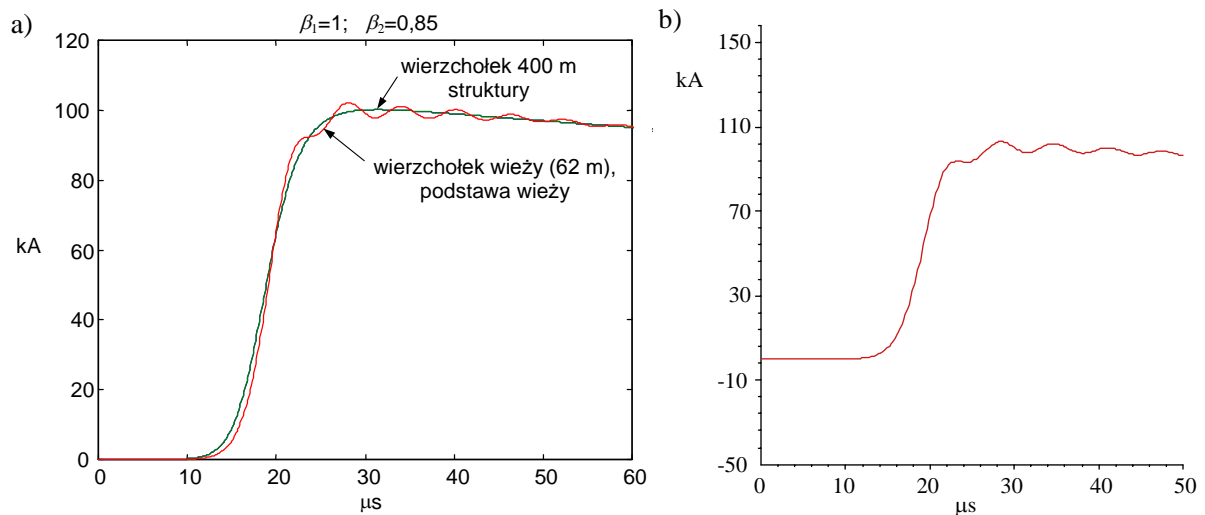
Przebiegi otrzymanych prądów i napięć (rozdział 7.1) wymagają więc odpowiedniego przeskalowania. Przy założeniu, że dla danego modelu stacji wartości współczynników odbicia nie zależą od kształtu prądu pioruna (są takie same w przypadku wyładowań pierwszego oraz następnych), współczynnik przeskalowania można odczytać z odpowiednich przebiegów prądów z rys. 7.20 b). W rozważanym przypadku modelu nr (3), współczynnik przeskalowania wynosi $1,932 = 1,38 \cdot 1,4$ (gdzie: 1,38 – wartość współczynnika przepuszczania na granicy wieża-kanał wyładowania; 1,4 – krotność, o jaką wzrosły wartości szczytowe całkowitych prądów w wierzchołku i u podstawy wieży w stosunku do wartości szczytowej fali przepuszczonej – rys. 7.20 b) dla $\beta_1 = 0,38$ i $\beta_2 = 0,85$).



Rys. 7.20. Przebiegi prądów w wieży dla przypadków odpowiadających wyładowaniom następnemu (a) oraz pierwszemu (b), wykreślone z zależności (7.1) i (7.2) przy różnych wartościach współczynników odbicia β_1 i β_2

W przypadku modelowania struktur wysokich (wysoka wieża lub wieża wraz z dolną częścią kanału wyładowania), eliminacja efektów odbić od źródła prądu umieszczonego na szczycie struktury dla pierwszego wyładowania głównego może być konieczna także ze względu na kształty prądów. Dla struktury o wysokości 400 m opóźnienie fali biegnącej ze szczytu do ziemi i z powrotem wynosi ok. 3 μs . Przebiegi prądu źródła (wierzchołek 400 m struktury) oraz prądów na wysokościach 62 m i tuż nad ziemią dla takiego przypadku, wy-

znaczone ze wzorów (7.1) i (7.2), przedstawiono na rys. 7.21 a). Założono współczynnik odbicia od źródła prądu $\beta_1 = 1$ oraz współczynnik odbicia od uziomu $\beta_2 = 0,85$. Rysunek 7.21 b) przedstawia przykładowy przebieg prądu w wierzchołku 62 m wieży wyznaczony numerycznie dla modelu nr (2) stacji z dołączonym kanałem o długości 400 m.



Rys. 7.21. Przebiegi prądów: a) w wierzchołku i u podstawy wieży wykreślone z zależności (7.1) i (7.2); b) w wierzchołku wieży wyznaczony numerycznie dla modelu nr (2) stacji wraz z dołączonym 400 m kanałem; pierwsze wyładowanie główne

Jak widać, dla struktur o wysokościach ok. 400 m, w przebiegach prądów zaczynają się ujawniać zjawiska falowe (oscylacje związane z odbiciami od źródła prądu oraz od uziomu). Zgodność kształtów prądów w wierzchołku wieży otrzymanych na podstawie równania (7.1) oraz numerycznie w programie HIFREQ (rys. 7.21 a) i b)) można jednak uznać jeszcze za dobrą. Zatem w przypadku konstrukcji o wysokościach mniejszych niż ok. 400 m, pełna analiza zjawisk falowych zachodzących podczas pierwszego wyładowania głównego oraz eliminacja efektów odbić od źródła prądu nie jest konieczna. Wystarczy odpowiednie przeskalowanie przebiegów prądów i napięć otrzymanych numerycznie przy zastosowaniu idealnego źródła prądu na szczycie tej konstrukcji. Z drugiej strony, do odpowiedniego przeskalowania otrzymanych prądów i napięć konieczna jest znajomość wartości współczynników odbicia, które można wyznaczyć tylko w przypadku, gdy czas czoła impulsu prądu wyładowania jest wystarczająco krótki (wyładowanie następne).

W modelu wyładowania, który zastosowano do wyznaczenia wartości współczynników odbicia dolną część kanału reprezentowano pionowym przewodem o długości 400 m. Do górnego końca tego przewodu dołączono zewnętrzne źródło prądu o kształcie odpowiadającym następnemu wyładowaniu głównemu (równanie (2.2)), a dolny koniec tego przewodu dołączono do zwodu pionowego na szczycie wieży. Wykorzystując taki model wyładowania do oceny zagrożenia piorunowego należałoby uwzględnić następujące uwagi:

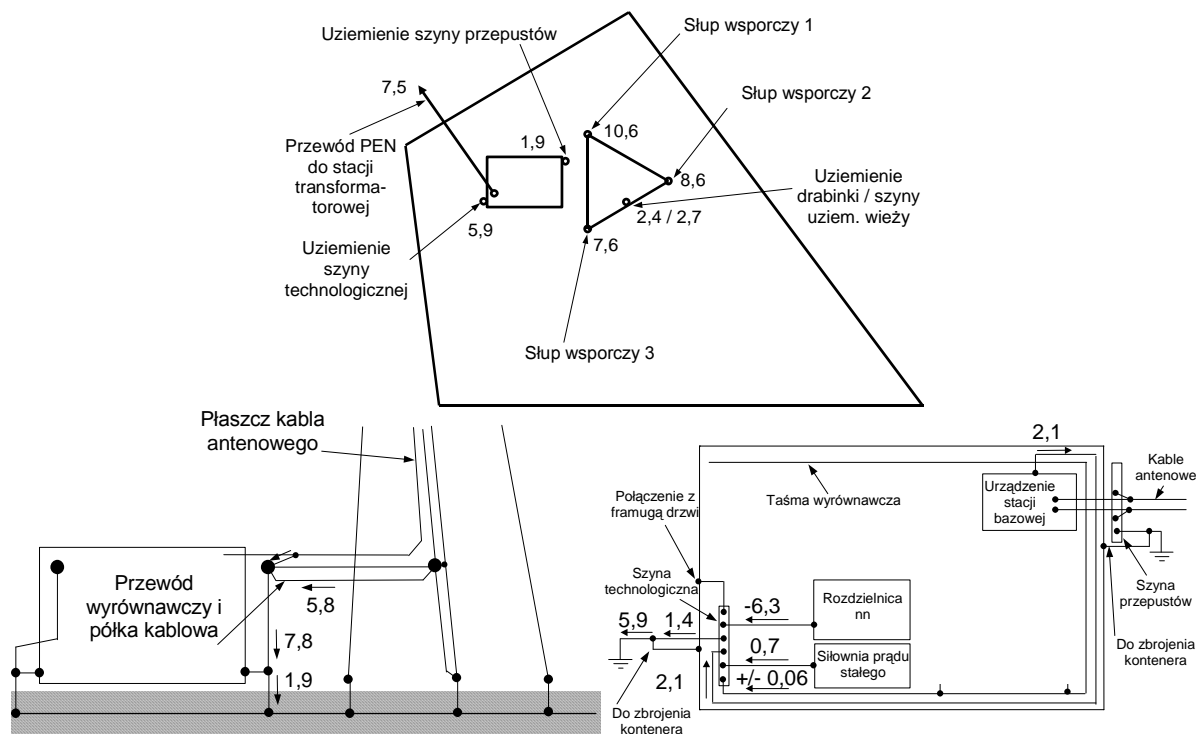
- 1) Wartość szczytowa fali padającej prądu u podstawy kanału wyładowania (ok. 22,3 kA, rys. 7.17) jest niższa, a wartość szczytowa fali przepuszczonej w wierzchołku wieży (ok. 30,59 kA, rys. 7.16 b)) jest wyższa niż założona dla III poziomu ochrony (25 kA).
- 2) Począwszy od momentu pojawienia się fali odbitej od źródła prądu na szczycie kanału, otrzymane przebiegi prądów i napięć są błędne.
- 3) W zakresie czasu mniej więcej od osiągnięcia maksimum do momentu pojawienia się fali odbitej od źródła prądu, otrzymane numerycznie przebiegi prądów wykazują odkształcenia w stosunku do przebiegów teoretycznych (powolny wzrost prądu, rys. 7.15, 7.18).

W zastosowanym w dalszej części pracy modelu wyładowania, zakładającym zmodyfikowany przebiegu prądu źródła zewnętrznego dołączonego w punkcie uderzenia pioruna do wieży, problemy powyższe zostały rozwiązane w następujący sposób:

- 1) Dla zmodyfikowanego przebiegu prądu źródła założono, że ustalony w normach ochrony odgromowej prąd pioruna o kształcie $0,25/100 \mu s$ i wartości szczytowej 25 kA odpowiada tylko fali padającej prądu u podstawy kanału wyładowania $i_1(t)$.
- 2) Efekt nierzeczywistego odbicia od źródła prądu w wierzchołku wieży zostanie skompensowany poprzez zastosowanie modyfikacji kształtu prądu źródła, która uwzględnia wszystkie realne składowe fal odbijanych w punktach nieciągłości impedancji wieża-kanał oraz wieża-uziom (rys. 7.18).
- 3) Zaobserwowane w analizach numerycznych tłumienie oraz odkształcenie prądu przemieszczającego się w dół kanału wyładowania (rys. 7.15, 7.18) związane są z umieszczeniem źródła na szczycie kanału i zależą od parametrów elektrycznych przewodu modelującego kanał. Uwzględniając ten fakt przyjęto, że nie powinny być one odwzorowane w zmodyfikowanym przebiegu prądu źródła w wierzchołku wieży. Kształt zmodyfikowanego przebiegu prądu źródła przyjęto więc zgodnie z przebiegiem teoretycznym wyznaczonym wg równania (7.1) w całym zakresie czasu. Nie brano pod uwagę niewielkiego wzrostu prądu występującego w przebiegu otrzymanym numerycznie w zakresie czasu od osiągnięcia maksimum do momentu pojawienia się fali odbitej od źródła prądu (rys. 7.18).

7.3. Następne wyładowanie piorunowe

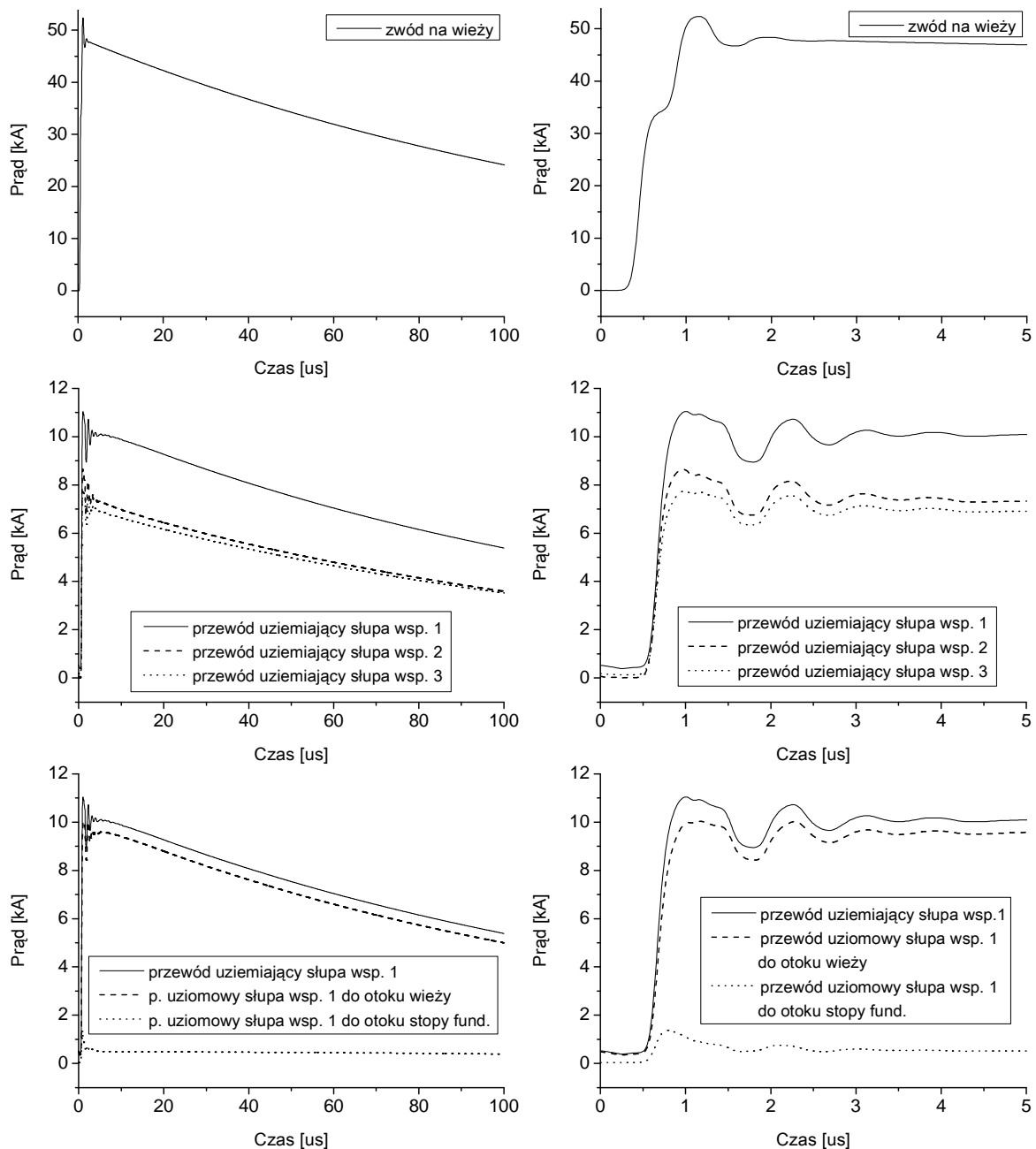
W przedstawionych analizach zewnętrzne źródło prądu o zmodyfikowanym według równania (7.1) kształcie dołączono do wierzchołka wieży (zvodu pionowego). W równaniu tym wykorzystano wartości współczynników odbicia na granicy wieża-kanał oraz wieża-uziom wyznaczone w poprzednim rozdziale. Rozpływ prądów w modelu nr (3) stacji przedstawiono na rys. 7.22 (podano wartości szczytowe prądów w [kA]).



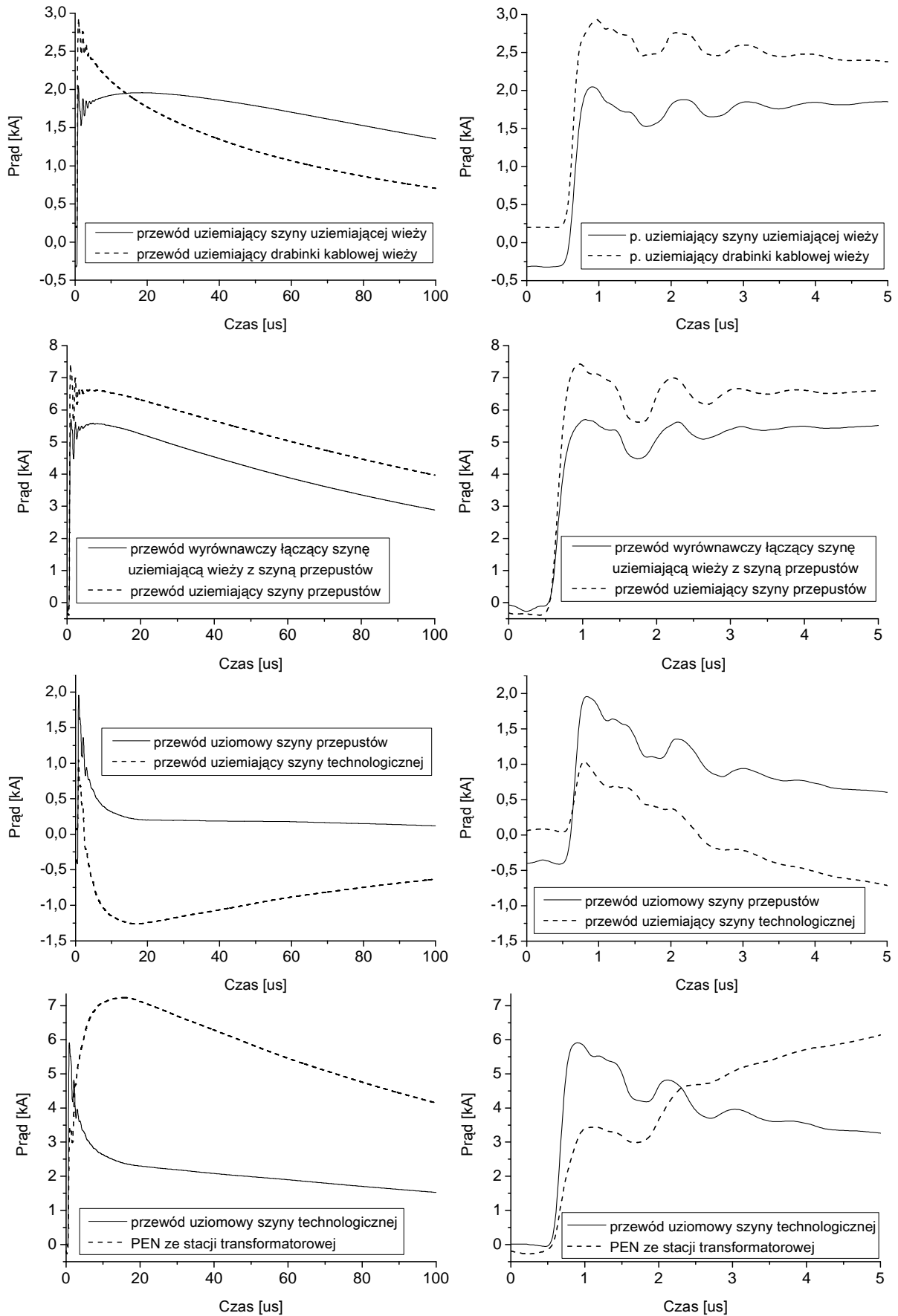
Rys. 7.22. Rozpływ prądów w stacji (w [kA]) odpowiadający wyładowaniu następnemu z modyfikacją przebiegu prądu źródła ($\beta_1 = 0,38$ i $\beta_2 = 0,85$); model nr (3)

Otrzymany rozptył prądów w stacji odpowiadający wyładowaniom następnym nie różni się zasadniczo w stosunku do rozptyłu prądów otrzymanego w przypadku wyładowania pierwszego dla modelu nr (3). Podział prądów pomiędzy główne elementy łączące nadziemne i zakopane części konstrukcji i instalacji oraz najważniejsze elementy instalacji wewnątrz kontenera w przypadku wyładowania następnego dla modelu nr (3) (rys. 7.22), nie odbiega również znacząco w stosunku do otrzymanego w przypadku wyładowania pierwszego dla modelu nr (2) (rys. 7.1 b)). W szczególności, wartość szczytowa prądu odpływającego do stacji transformatorowej wyniosła ok. 14 % całkowitego prądu udarowego wpływającego do wierzchołka wieży (uwzględniającego wszystkie składowe odbite).

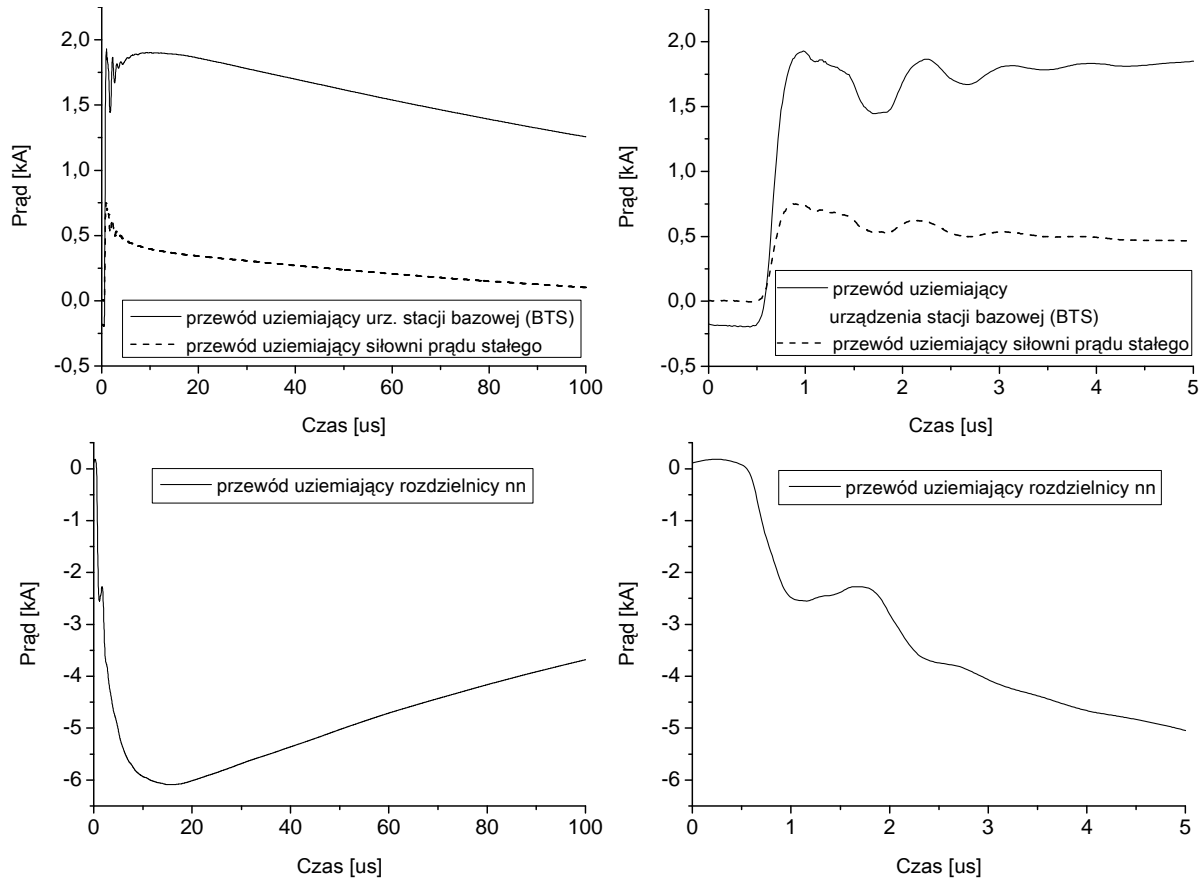
Przebiegi czasowe prądów w wybranych elementach konstrukcji i instalacji stacji przedstawiono na rys. 7.23 – 7.25.



Rys. 7.23. Przebiegi prądów płynących w wybranych elementach instalacji stacji (szczegóły uziemiania słupów wsporczych wieży – rys. 5.7 c)); przebiegi po lewej i prawej stronie rysunku przedstawiają te same prądy, lecz w różnych skalach czasowych



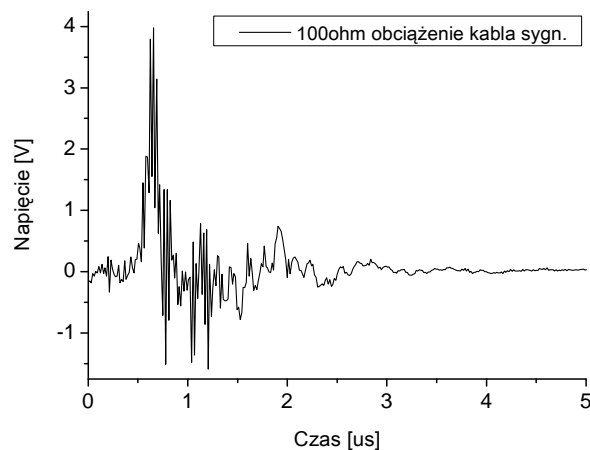
Rys. 7.24. Przebiegi prądów płynących w wybranych elementach instalacji stacji; po lewej i prawej stronie rysunku przedstawiono te same prądy, lecz dla różnych skal czasu



Rys. 7.25. Przebieg prądów płynących w wybranych elementach instalacji w kontenerze; przebiegi po lewej i prawej stronie rysunku przedstawiają te same prądy, lecz w różnych skalach czasowych

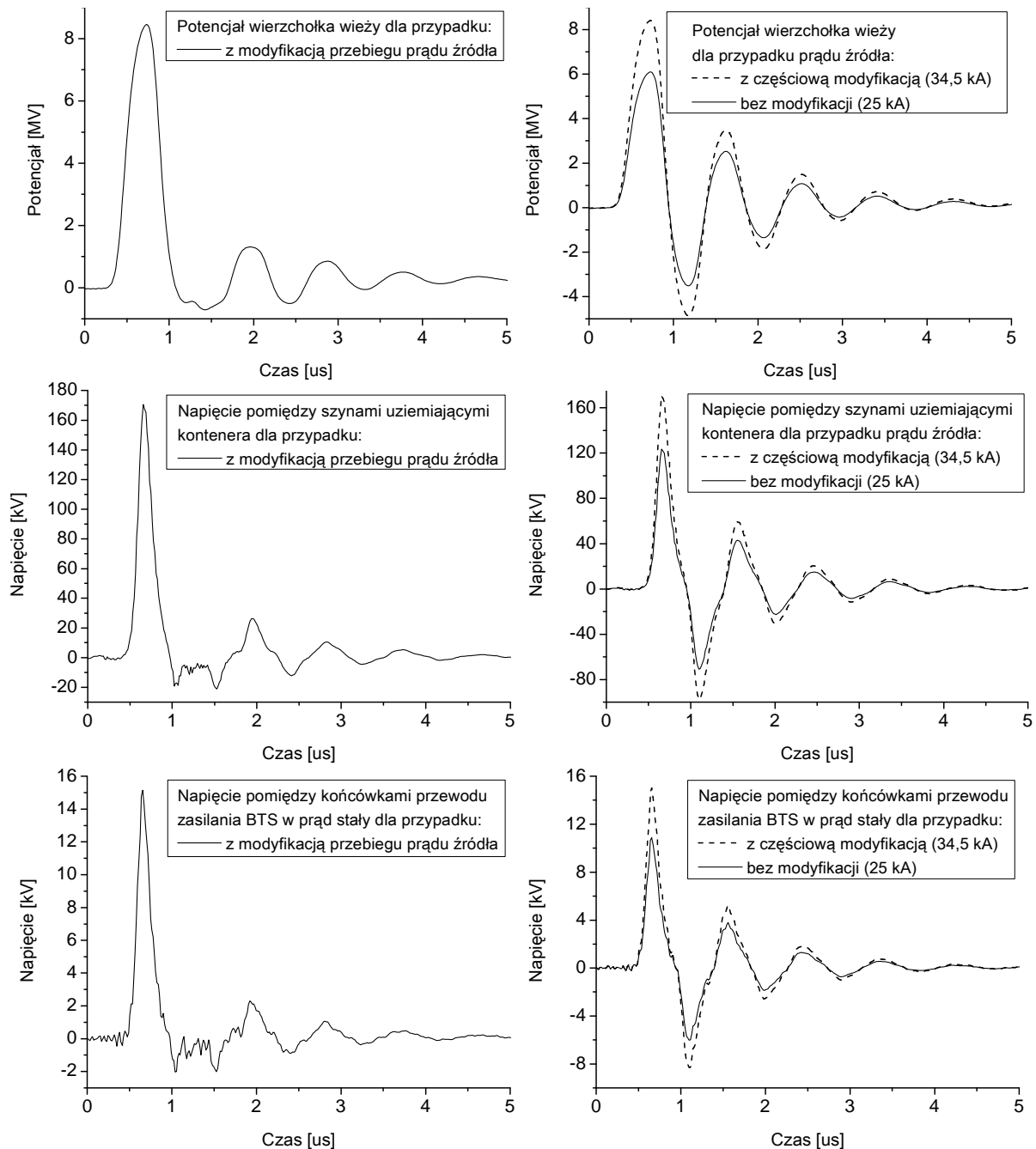
Otrzymane przebiegi prądów w stacji charakteryzują się obecnością oscylacji o znacznie mniejszych amplitudach w porównaniu z przypadkiem, w którym nie zastosowano modyfikacji kształtu prądu źródła dołączonego do wierzchołka wieży (rys. 7.13 b)).

Na rysunku 7.26 przedstawiono przebieg spadku napięcia wytworzonego na $100\ \Omega$ rezystancji obciążenia kabla sygnałowego w kontenerze. Wartość tego napięcia jest niewielka, lecz wielokrotnie wyższa niż w przypadku pierwszego wyładowania głównego (tablica 7.2).



Rys. 7.26. Przebieg spadku napięcia na $100\ \Omega$ rezystancji obciążenia dwużyłowego przewodu sygnałowego w kontenerze, wytworzonego przez prąd indukowany

Przebiegi potencjału wierzchołka wieży względem odległej ziemi odniesienia oraz spadków napięć na elementach instalacji i konstrukcji stacji dla analizowanego przypadku ze zmodyfikowanym kształtem prądu piorunowego w wierzchołku wieży (prądu źródła zewnętrznego dołączonego do wierzchołka wieży), przedstawiono na rys. 7.27 – przebiegi po lewej stronie rysunku. Dla porównania, po prawej stronie rysunku przedstawiono przebiegi napięć otrzymane dla tego samego modelu stacji, odpowiadające przypadkom dołączenia do wierzchołka wieży zewnętrznego źródła prądu o kształcie $0,25/100 \mu\text{s}$ i wartościach szczytowych równych odpowiednio 25 kA (bez modyfikacji przebiegu prądu źródła) oraz 34,5 kA (częściowa modyfikacja wartości szczytowej prądu źródła, która uwzględnia tylko pierwszą falę odbitą od wierzchołka wieży: $(1+0,38) \cdot 25 \text{ kA} = 34,5 \text{ kA}$).



Rys. 7.27. Przebiegi potencjałów oraz spadków napięć w stacji otrzymane dla przypadków: z modyfikacją przebiegu prądu źródła wg równania (7.1) – po lewej; oraz bez modyfikacji i z częściową modyfikacją prądu źródła – po prawej

Przebiegi potencjałów oraz spadków napięć dla przypadków z modyfikacją oraz bez modyfikacji lub z częściową modyfikacją prądu źródła różnią się zasadniczo kształtem. W przypadku bez lub z częściową modyfikacją jest to przebieg oscylacyjny, natomiast w przypadku z pełną modyfikacją przebiegu prądu źródła występują tylko impulsy o polaryzacji dodatniej. Uwidaczniają się również wyraźnie różnice w wartościach szczytowych potencjałów oraz napięć dla porównywanych przypadków modeli wyładowania.

Dla zgrubnych oszacowań, w przypadku których istnieje potrzeba wyznaczenia tylko wartości szczytowych powstających spadków napięć, przebieg prądu u podstawy kanału wyładowania (prądu źródła zewnętrznego dołączonego do wierzchołka wieży) można przyjąć zgodnie z równaniem (2.2), o kształcie $0,25/100 \mu\text{s}$ i wartości szczytowej 25 kA. Otrzymane w ten sposób wartości prądów i napięć powinno się jednak przemnożyć przez wartość współczynnika przepuszczania na granicy wieża-kanał wyładowania α_1 , która zwykle jest nieznana. Wobec zbliżonych wartości współczynnika odbicia β_1 na granicy wieża-kanał, obserwowanych w przypadkach rzeczywistych wyładowań w różnego typu wieże, można założyć, że wartość ta mieści się w określonym przedziale (tablica 7.5).

W przypadku konieczności prowadzenia dokładnych analiz także kształtów powstających spadków napięć, niezbędne jest wcześniejsze oszacowanie wartości obu współczynników odbicia wieża-kanał wyładowania oraz wieża-uziom, poprzez uwzględnienie w modelu obecności dolnej części kanału wyładowania. W następnej kolejności można przeprowadzić obliczenia przy założeniu odpowiednio zmodyfikowanego kształtu prądu źródła.

Jak widać z rys. 7.27, wartości spadków napięć powstających na elementach instalacji obiektu w przypadku wyładowania następnego są znaczne. Wartość szczytowa spadku napięcia występującego pomiędzy szynami uziemiającymi kontenera wynosi ok. 170 kV. Wartość szczytowa napięcia wynoszonego poprzez okablowanie do zacisków zasilających w prąd stały urządzenia stacji bazowej jest kilkunastokrotnie niższa (podobnie, jak w przypadku pierwszego wyładowania głównego) i wynosi ok. 15 kV.

7.4. Podsumowanie

Zestawienie otrzymanych wartości szczytowych napięć oraz potencjałów w stacji dla przypadków odpowiadających pierwszemu i następnym wyładowaniom głównym, przedstawiono w tablicy 7.6. W przypadku wyładowania pierwszego dla modelu nr (3), przedstawiono wyniki otrzymane z obliczeń bezpośrednio bez przeskalowania (rozdział 7.1), oraz po ich przeskalowaniu. Przeskalowania dokonano odpowiednio do przyjętego założenia, że określony w normach ochrony odgromowej prąd pioruna o wartości 100 kA odpowiada tylko fali padającej prądu u podstawy kanału wyładowania oraz, że wartości obu współczynników odbicia nie zależą od kształtu prądu (współczynnik przeskalowania równy 1,932 – rys. 7.20 b) przy $\beta_1 = 0,38$ i $\beta_2 = 0,85$). W przypadku wyładowania następnego dla modelu nr (3), przedstawiono wyniki odpowiadające przypadkom bez, z częściową oraz z pełną modyfikacją kształtu i wartości szczytowej prądu źródła (fali padającej prądu pioruna oraz poszczególnych składowych odbitych).

Porównując otrzymane wyniki należy stwierdzić istotny wpływ modelu wyładowania uwzględniającego rzeczywiste zjawiska falowe zachodzące w wieży na kształty i wartości szczytowe spadków napięć powstających w obiekcie. Wynika to z faktu, że zachodzące zjawiska falowe mają bezpośredni i istotny wpływ na kształt i wartość szczytową całkowitego prądu pioruna u podstawy kanału wyładowania. Co więcej, nawet dla pierwszego wyładowania głównego, dla którego czas narastania czoła prądu jest dużo dłuższy w porównaniu z czasem propagacji fali wzdłuż wieży, nieuwzględnienie rzeczywistej impedancji falowej kanału w modelu wyładowania prowadzi do niewłaściwej interpretacji wartości prądu pioruna u podstawy kanału wyładowania. Może to spowodować zaniżenie poziomu oceny zagrożenia zwią-

zanego z pierwszym wyładowaniem głównym. Wartości spadków napięć otrzymane dla modelu pierwszego wyładowania głównego uwzględniającego impedancję falową kanału zbliżoną do rzeczywistej (przeskalowane), są prawie dwukrotnie wyższe, w porównaniu z modelem nie uwzględniającym rzeczywistych odbić w wierzchołku wieży. Dla wyładowania następnego różnica jest mniejsza, lecz również znacząca. Wartości szczytowe napięć dla modelu z modyfikacją przebiegu prądu źródła wzrosły ok. 1,38-krotnie (tj. o krotność odpowiadającą wartości współczynnika przepuszczania na granicy wieża-kanał wyładowania).

Tablica 7.6. Wartości szczytowe potencjałów oraz spadków napięć powstających w stacji bazowej GSM dla różnych kształtów prądu pioruna

Kształt prądu pioruna	Model stacji	Potencjał wierzchołka wieży	Napięcie pomiędzy szynami kontenera	Napięcie pomiędzy żyłami przewodu zasilania dc BTS	Napięcie na 100 Ω obciążeniu kabla sygn.
		[MV]	[kV]	[kV]	[V]
10/350 μs; 100 kA nie przeskalowany	Model nr (1)	1,20	9,1	0,72	0,11
0,25/100 μs; 25 kA bez modyfikacji		5,86	113,75	-	2,2
10/350 μs; 100 kA nie przeskalowany	Model nr (3)	1,22	9,7	0,7	0,28
10/350 μs; 100 kA przeskalowany		2,36	18,7	1,35	0,54
0,25/100 μs; 25 kA bez modyfikacji		6,1	123,5	10,87	-
0,25/100 μs; 25 kA z częściową modyfikacją (34,5 kA)		8,422	170,5	15,0	-
0,25/100 μs; 25 kA z modyfikacją		8,46	170,75	15,17	4,0

Wartość potencjału wierzchołka wieży względem odległej ziemi odniesienia dla wyładowania następnego jest ok. 3,6 razy wyższa w porównaniu z przypadkiem odpowiadającym pierwszemu wyładowaniu głównemu. Wartości spadków napięć powstających na elementach instalacji stacji oraz wytworzonych przez prądy indukowane są natomiast ok. 7 – 11 razy większe. Wynika to w głównej mierze z większej stromości narastania czoła prądu wyładowania następnego. Szybkość zmian prądu na czole dla prądu udarowego 10/350 μs o wartości szczytowej 100 kA wynosi ok. 13 kA/μs, natomiast dla prądu udarowego 0,25/100 μs o wartości szczytowej 25 kA, ok. 136 kA/μs. Maksymalna stromość narastania czoła dla prądu wyładowania następnego jest więc ok. 10 razy większa niż dla prądu wyładowania pierwszego.

7.5. Obiekt radiokomunikacyjny typu wieża-budynek

Przedstawione dotychczas rozważania dotyczyły niewielkiego obiektu radiokomunikacyjnego, jakim jest stacja bazowa systemu telefonii komórkowej. W przypadku większego obiektu, zawierającego budynek, wykonanie pomiarów terenowych rozptyłów prądów udarowych może być znacznie utrudnione technicznie i organizacyjnie. Także prowadzenie analiz numerycznych dla takich obiektów jest bardziej czasochłonne i wymaga większych nakładów obliczeniowych. Spostrzeżenia dotyczące wyników badań przeprowadzonych dla małej stacji bazowej, można jednak wykorzystać w analizach numerycznych zagrożenia pioruno-

wego w innych (większych) typach stacji radiokomunikacyjnych oraz dla przypadków innych rozwiązań ochrony odgromowej, do tworzenia odpowiednich modeli matematycznych obiektu, środowiska oraz zachodzących zjawisk.

Na rysunku 7.28 przedstawiono modele numeryczne obiektu radiokomunikacyjnego składającego się z wieży antenowej o wysokości 40 m oraz trzypiętrowego budynku o wymiarach: 14,8 m x 10,8 m x 12 m (długość x szerokość x wysokość). Przedstawione modele odpowiadają różnym konfiguracjom urządzeń piorunochronnych budynku:

- rys. 7.28 a): wewnętrzny system wyrównywania potencjałów izolowany i zrealizowany w układzie promieniowym, znaczne odległości pomiędzy elementami sieci zwodów i przewodów odprowadzających;
- rys. 7.28 b): wewnętrzny system wyrównywania potencjałów zrealizowany w układzie siatkowym, gęstsza sieć zwodów i przewodów odprowadzających.

W obu konfiguracjach uwzględniono jedynie najistotniejsze elementy i instalacje przewodzące (systemy uziomowy i wyrównywania potencjałów oraz podstawowe elementy konstrukcji wieży). Pozostałe elementy konstrukcji i instalacji zostały znacznie zredukowane. Uproszczono konstrukcję wieży (brak ukośnych elementów łączących) oraz system okablowania na zewnątrz i wewnątrz budynku (tylko jeden kabel antenowy, tylko część okablowania oraz niektóre urządzenia w budynku). Ponadto brak jest metalowych konstrukcji wsporczych kabli antenowych. Przyjęto jednorodny model gruntu o rezystywności $100 \Omega\text{m}$.

Bezpośrednie wyładowanie pioruna w wieżę modelowano przy użyciu zewnętrznego źródła prądu umieszczonego w wierzchołku wieży (w zwodzie pionowym). Analizowano przypadki odpowiadające pierwszemu oraz następnym wyładowaniom głównym w kanale:

- wyładowanie pierwsze: kształt 10/350 μs , wartość szczytowa 100 kA;
- wyładowanie kolejne: kształt 0,25/100 μs , wartość szczytowa 25 kA.

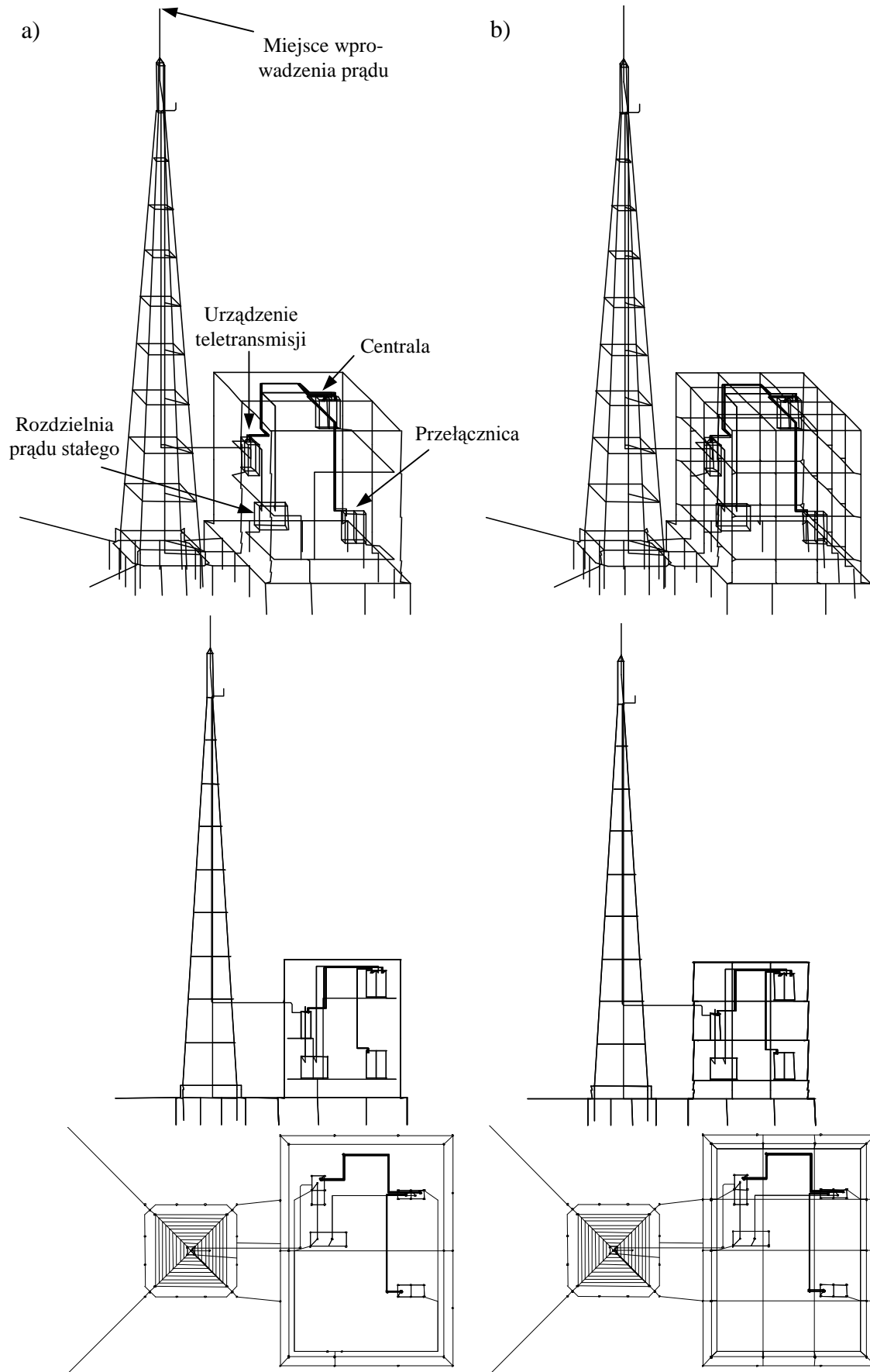
Szczegółowe wyniki uproszczonych analiz przedstawiono w publikacjach [63, 64, 74, 80, 81]. Uproszczenia dotyczyły modelu wyładowania piorunowego, w którym:

- (1) przebieg prądu piorunowego u podstawy kanału wyładowania przyjęto w postaci funkcji dwuwykładniczej (równanie (2.1));
- (2) nie uwzględniano rzeczywistej impedancji falowej kanału wyładowania – przebieg prądu pioruna u podstawy kanału wyładowania (prąd źródła) bez modyfikacji.

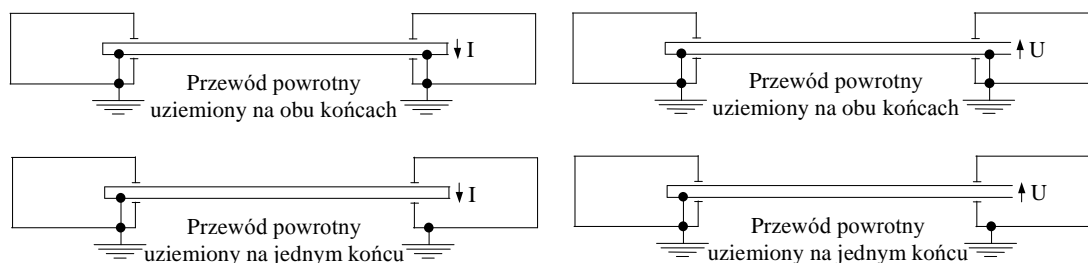
W związku z przyjętymi uproszczeniami, otrzymane wyniki tych analiz mogą służyć jedynie do zgrubnych oszacowań wartości szczytowych prądów i napięć. Przy czym wartości szczytowe otrzymanych napięć należy przeskalować odpowiednio do maksymalnych stromości narastania czoła prądów wyładowań pierwszego i następnych, właściwych dla funkcji zalecanej przez normy ochrony odgromowej (rozdz. 7.4). Dodatkowo, wartości szczytowe zarówno napięć jak i prądów powinny zostać przeskalowane odpowiednio do wartości prądu w wierzchołku wieży, uwzględniającego rzeczywiste efekty odbić fal w wierzchołku oraz u podstawy wieży.

Celem stosowania wspomnianych uproszczeń w modelu wyładowania piorunowego było maksymalne skrócenie czasu obliczeń. Możliwe jest jednak prowadzenie bardziej dokładnych analiz przy wykorzystaniu modelu wyładowania zaproponowanego dla stacji bazowej.

Modele obiektu porównywano pod kątem wartości pól elektromagnetycznych wytworzonych wewnątrz budynku, prądów wpływających do budynku ekranami kabli antenowych oraz prądów i napięć powstających w okablowaniu budynku. Analizowano przypadki odpowiadające pierwszemu i następnym wyładowaniom głównym. Prądy w okablowaniu wyznaczano przy zwartych zaciskach żył przewodów natomiast napięcia na zaciskach otwartych, przy różnych rozwiązaniach uziemienia żył powrotnych tych przewodów (rys. 7.29). Podsumowanie otrzymanych wyników, po dokonaniu odpowiednich przeskalowań przedstawiono w tablicy 7.7. Przeskalowań, wynikających z zaniedbania zjawisk falowych, dokonano przy założeniu tych samych wartości współczynników odbicia, jak dla przypadku stacji bazowej.



Rys. 7.28. Modele numeryczne obiektu radiokomunikacyjnego typu wieża-budynek odpowiadające różnym konfiguracjom urządzeń piorunochronnych budynku



Rys. 7.29. Konfiguracje okablowania zastosowane w modelach z rys. 7.28, w których wyznaczano napięcia i prądy

Tablica 7.7. Wartości szczytowe prądów i napięć w okablowaniu systemów wewnątrz budynku otrzymane dla modelu z rys. 7.28 a) w przypadku pierwszego i następnych wyładowań głównych

Okablowanie	Interfejs urządzenia	Prąd [A]		Napięcie [kV]	
		Pierwsze	Następne	Pierwsze	Następne
Przewód zasilania dc z rozdzielni uziemiony na obu końcach	Urządzenie teletransmisji	1770	1220	-	-
	Centrala	640	690	-	-
Przewód sygnałowy pomiędzy urządzeniem teletransmisji a centralą uziemiony na obu końcach	Centrala	895	560	4,1	16
Przewód sygnałowy pomiędzy centralą a przełącznicą uziemiony na obu końcach	Przełącznica	700	400	3,5	25
Przewód sygnałowy pomiędzy urządzeniem teletransmisji a centralą uziemiony na jednym końcu	Centrala	20,5	37	0,3	6,2
Przewód sygnałowy pomiędzy centralą a przełącznicą uziemiony na jednym końcu	Przełącznica	7,3	81	0,2	13

Rozpływy prądów przewodzonych (tj. prądów płynących w przewodach, w których żyły powrotne uziemiano na obu końcach) dla przypadków odpowiadających wyładowaniom pierwszemu oraz następnemu mają podobny charakter. Wartości prądów płynących w przewodach zasilających centrali są mniejsze w porównaniu do prądów płynących w przewodach zasilających urządzenia teletransmisji. Natomiast wartości prądów płynących w przewodach sygnałowych łączących centralę z przełącznicą są mniejsze w porównaniu do prądów płynących w przewodach sygnałowych łączących urządzenie teletransmisji z centralą.

W przypadku prądów indukowanych (w przewodach, w których żyły powrotne uziemiano na jednym końcu) oraz spadków napięć, sytuacja jest różna dla wyładowania pierwszego oraz wyładowań następnych. Dla pierwszego wyładowania głównego wartości szczytowe prądów i napięć w przewodzie łączącym centralę z przełącznicą są mniejsze niż w przewodzie łączącym urządzenie teletransmisji z centralą. Natomiast dla wyładowania następnego sytuacja jest odwrotna. Zaobserwować można silne zjawiska rezonansowe w okablowaniu łączącym centralę z przełącznicą, co objawia się znacznym wzrostem wartości szczytowych prądów indukowanych oraz napięć dla obu sposobów uziemienia przewodów powrotnych. Ponieważ długości obu przewodów (pomiędzy urządzeniem teletransmisji a centralą oraz

między centralą a przełącznicą) są porównywalne (po ok. 17 m), obserwowane zjawiska rezonansowe mogą być związane z określonym rozmieszczeniem okablowania. Należałoby więc rozważyć zmiany w trasie prowadzenia kabli pomiędzy centralą a przełącznicą. Wpływ na powstawanie opisanych zjawisk rezonansowych w okablowaniu może mieć również zastosowanie modelu wyładowania bez modyfikacji przebiegu prądu źródła.

8. Podsumowanie

Ocena zagrożenia urządzeń w obiekcie radiokomunikacyjnym trafionym przez wyładowanie piorunowe wymaga przeprowadzenia dokładnych analiz rozptyłu prądu pioruna oraz spadków napięć powstających w elementach konstrukcji i instalacji tego obiektu. Należy uwzględnić wszystkie istotne czynniki i zjawiska elektromagnetyczne zachodzące w złożonym układzie, jaki tworzą:

- trafiony obiekt radiokomunikacyjny;
- inne połączone z nim obiekty i systemy;
- środowisko, w którym te obiekty się znajdują (parametry elektryczne ziemi);
- wyładowanie piorunowe (układ kanał z prądem piorunowym-chmura).

W pracy do analizy zagrożenia piorunowego zastosowano połączenie łatwych w realizacji, eksperymentalnych metod badań terenowych z zaawansowanymi metodami analiz numerycznych, które rozbudowano o autorskie rozważania teoretyczne.

Porównanie wyników symulacyjnych pomiarów terenowych z wynikami analiz numerycznych przeprowadzonych dla różnych modeli badanej stacji bazowej umożliwiło:

- Opracowanie i zweryfikowanie modeli numerycznych stacji oraz modeli gruntu stosowanych do dalszych rozważań i analiz zagrożenia piorunowego.
- Zweryfikowanie założeń oraz opracowanie zaleceń dotyczących stopnia szczegółowości odwzorowania elementów konstrukcji i instalacji w modelu numerycznym stacji oraz modelu gruntu, wymaganych do wyznaczenia rozptyłu prądów oraz powstających spadków napięć z określonym przybliżeniem.
- Zweryfikowanie przyjętych założeń oraz opracowanie zaleceń dotyczących metod eksperymentalnych badań terenowych i analiz numerycznych rozptyłu prądów udarowych w obiektach radiokomunikacyjnych.

Opracowane modele stacji oraz gruntu zastosowano następnie do analiz numerycznych zagrożeń powstających podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego. W wyniku tych analiz uzyskano przedstawione poniżej rezultaty:

- Rozszerzono opracowane wytyczne i uogólnienia dotyczące budowy modelu numerycznego obiektu radiokomunikacyjnego przez określenie stopnia szczegółowości informacji o obiekcie i środowisku wymaganych do analizy i oceny zagrożenia urządzeń podczas bezpośredniego uderzenia pioruna w wieżę.
- Opracowano model wyładowania piorunowego uwzględniający z zadawalającym przybliżeniem rzeczywiste zjawiska falowe zachodzące w wieży podczas bezpośredniego uderzenia pioruna (zastępcza impedancja falowa kanału zbliżona do rzeczywistej). Osiągnięto to poprzez odpowiednią modyfikację przebiegu prądu źródła w modelu wyładowania (prądu pioruna u podstawy kanału wyładowania).
- Zaproponowany model wyładowania o zmodyfikowanym przebiegu prądu źródła zastosowano do oceny poziomego zagrożenia piorunowego urządzeń odpowiadającego wyładowaniu następnemu.

- Zweryfikowano ostatecznie (na podstawie analiz teoretycznych) wyznaczony poziom zagrożenia piorunowego urządzeń odpowiadający pierwszemu wyładowaniu głównemu, uwzględniając zbliżoną do rzeczywistej wartość zastępczej impedancji falowej kanału wyładowania przy interpretacji wartości szczytowej całkowitego prądu pioruna u podstawy kanału wyładowania.

Przeprowadzono również uproszczone analizy numeryczne bezpośredniego wyładowania piorunowego w wieżę większego obiektu radiokomunikacyjnego, odpowiadające pierwszemu i następnym wyładowaniom głównym w kanale oraz oszacowano zgrubnie poziom zagrożenia piorunowego urządzeń w tym obiekcie.

Otrzymane wyniki omówiono szczegółowo w poszczególnych rozdziałach w pracy. Poniżej podsumowano krótko najważniejsze z nich.

- 1) Przedstawione metody pomiaru rozptywu prądów udarowych w obiektach radiokomunikacyjnych pozwalają na określenie z zadawalającą dokładnością podziału prądów udarowych w elementach konstrukcji i instalacji stacji. Z tego punktu widzenia stanowią więc użyteczne źródło informacji o zachowaniu się i właściwościach stacji oraz innych połączonych z nią obiektów w warunkach rozptywających się prądów udarowych.
- 2) W głównych elementach odprowadzających prąd z części nadziemnej do uziomu (przewody uziomowe słupów wsporczych wieży i szyny technologicznej), uzyskano zadawalającą dokładność odwzorowania w modelu numerycznym stacji bazowej rozptywu prądów udarowych w stosunku do rozptywów prądów uzyskanych z pomiarów. Znacznie większe rozbieżności zaobserwowano w przewodach wyrównawczych, głównie przy przepustach kablowych i wewnątrz kontenera oraz w tych elementach, w których płynęły prądy o stosunkowo małych wartościach. Przyczyny powstałych różnic opisano w rozdziale 6.
- 3) W przypadku stosunkowo rozbudowanych modeli stacji, dla których uzyskano dobrą zgodność wyników analiz numerycznych z wynikami badań terenowych (modele nr (1) oraz (2)), stwierdzono niewielki wpływ stopnia szczegółowości odwzorowania poszczególnych elementów instalacji i konstrukcji w modelu stacji na rozptyw prądów udarowych oraz na wartości powstających spadków napięć. Różnice zaobserwowano tylko w bezpośrednim otoczeniu miejsc, w których dokonywano zmian.
- 4) Bardziej istotne uproszczenia w modelu nr (3) stacji, dotyczące elementów instalacji i konstrukcji znajdujących się w dalszej odległości od kontenera, chociaż powodują istotne zmiany w rozptywach prądów w najbliższym otoczeniu tych elementów, to mają niewielki wpływ na wartości prądów i spadków napięć w samym kontenerze. Są to głównie:
 - ukośne i poziome elementy konstrukcji wieży łączące słupy wsporcze;
 - liczba kabli antenowych schodzących z wieży;
 - modele elementów wsporczych kabli czy drabinek kablowych.
- 5) Największy wpływ na otrzymywane wartości prądów oraz spadków napięć w kontenerze/budynku stacji mają elementy konstrukcji tego kontenera/budynku, konfiguracja systemu uziomowego (także wieży), konfiguracja okablowania w obiekcie oraz średnia rezystywność gruntu.
- 6) W pracy przeanalizowano wpływ zjawisk falowych zachodzących w układzie wieża-kanał wyładowania na przebiegi prądów rozptywających się w instalacjach oraz napięć wytworzonych przez te prądy. Stwierdzono, że w przypadku przyjęcia modelu wyładowania następnego w postaci idealnego źródła prądu o krótkim czasie narastania czoła oraz o kształcie, który jednoznacznie charakteryzuje czas narastania czoła oraz czas do połowy wartości szczytowej, umieszczonego w punkcie uderzenia pioruna na wieży, występują rozbieżności w kształtach prądów otrzymywanych numerycznie w stosunku do prądów rejestrowanych podczas naturalnych i prowokowanych wyładowań w wieże. Przyczyną tych

rozbieżności jest nieskończenie wielka wartość impedancji źródła prądu oraz nieuwzględnienie rzeczywistej impedancji falowej kanału wyładowania. W celu rozwiązania tego problemu zaproponowano metodę, która pozwala na uwzględnienie zastępczej impedancji falowej kanału w modelu wyładowania i równoczesną kompensację efektów nierzeczywistych odbić od idealnego źródła prądu. Metoda ta polega na odpowiedniej modyfikacji przebiegu prądu źródła, w którym uwzględniane są składowe fale prądowych odbijanych w wierzchołku oraz u podstawy.

- 7) Uwzględnienie odpowiednich składowych odbitych w przebiegu prądu źródła wymaga wstępnego oszacowania wartości współczynników odbicia w punktach nieciągłości impedancji (w wierzchołku oraz u podstawy wieży). Wartości współczynników odbicia wyznaczono na podstawie wyników wstępnych obliczeń numerycznych, w których zastosowano model wyładowania w postaci 400 m przewodu reprezentującego dolną część kanału wyładowania, pobudzanego na szczycie z idealnego źródła prądu. Wyznaczone numerycznie wartości współczynników odbicia są zbliżone do wartości otrzymanych na podstawie pomiarów prądów piorunowych prowadzonych w naturalnych warunkach.
- 8) Otrzymane przebiegi prądów oraz napięć w stacji odpowiadające modelom wyładowania następnego bez modyfikacji oraz z modyfikacją przebiegu prądu źródła różnią się od siebie. Dla modelu bez modyfikacji prądu źródła, przebiegi prądów wykazują obecność składowych odbitych (oscylacje na czole) o znacznych amplitudach. W przypadku modelu z modyfikacją, w odpowiednich przebiegach prądów występują tylko niewielkie składowe odbite wynikające z niewielkiej różnicy impedancji falowych wieży i kanału wyładowania. Przebiegi napięć mają natomiast postać kilku impulsów o jednakowej polaryzacji. Wartości szczytowe odpowiednich prądów i napięć dla przypadku modelu z modyfikacją przebiegu prądu źródła, w porównaniu z przypadkiem modelu bez modyfikacji, są wyższe α_1 -krotnie, gdzie α_1 jest wartością współczynnika przepuszczania na granicy kanał wyładowania-wieża.
- 9) W przypadku pierwszego wyładowania głównego, przy tej samej interpretacji zachodzących zjawisk, jaką przyjęto dla wyładowania następnego, przebiegi prądów i napięć wyznaczone w przypadku modelu wyładowania nie uwzględniającego rzeczywistej impedancji falowej kanału, powinny zostać przeskalowane. Na podstawie rozważań teoretycznych stwierdzono, że współczynnik przeskalowania może być dużo wyższy od tego, o jaki wzrosły wartości szczytowe prądów i napięć dla przypadku wyładowania następnego po zastosowaniu modyfikacji przebiegu prądu źródła. Powodem jest fakt, że w przypadku wyładowania pierwszego odpowiednie fale odbite od wierzchołka wieży oraz uziomu dodają się do siebie prawie bez opóźnień. Współczynnik przeskalowania w tym przypadku stanowi iloczyn wartości współczynnika przepuszczania na granicy kanał wyładowania-wieża α_1 , przez krotność, o jaką wartość szczytowa całkowitego prądu w wierzchołku wieży wzrosła w stosunku do wartości fali przepuszczonej (zależna od wartości obu współczynników odbicia wieża-kanał oraz wieża-uziom).
- 10) Głównym czynnikiem wpływającym na wartości spadków napięć powstających w elementach instalacji stacji, a więc na poziom zagrożenia piorunowego urządzeń, jest kształt prądu pioruna. Zaobserwowano, że wyładowanie kolejne powoduje wytworzenie impulsów napięć o wartościach szczytowych kilku-kilkunastokrotnie wyższych w porównaniu z pierwszym wyładowaniem głównym. Proporcja pomiędzy wartościami szczytowymi otrzymanych spadków napięć dla wyładowania pierwszego oraz następnego jest w przybliżeniu taka sama, jak proporcja pomiędzy stromością narastania prądu na czołach impulsów prądów tych wyładowań.
- 11) Obliczenia dla przypadku obiektu typu wieża-budynek prowadzono wykorzystując najprostsze modele wyładowania bez modyfikacji przebiegu prądu źródła, który opisywano

funkcją dwuwykładniczą. Dlatego też otrzymane przebiegi prądów i napięć po odpowiednim przeskalowaniu mogą być traktowane jedynie orientacyjnie i tylko w kategoriach wartości szczytowych. Problematyczna jest w tym przypadku również interpretacja niektórych z otrzymanych wartości szczytowych napięć. Zauważono bowiem powstawanie zjawisk rezonansowych także w systemach okablowania w budynku. Rezonanse te wynikają z jednej strony z określonych tras okablowania w budynku, z drugiej strony mogą mieć również związek ze zjawiskami falowymi zachodzącymi w wieży. Przemawia to na korzyść stosowania modelu wyładowania z modyfikacją przebiegu prądu źródła.

- 12) Dla danego typu obiektu, rodzaju i konfiguracji zastosowanych w nim instalacji uziomowych i wyrównywania potencjałów oraz dla określonych konfiguracji tras okablowania, możliwe jest wyznaczenie współczynników, które pozwalają na zgrubne oszacowanie spadków napięć w instalacjach oraz ocenę zagrożenia piorunowego urządzeń przy różnych wartościach rezystywności gruntu.

Przedstawione wyniki badań potwierdzają osiągnięcie założonych w pracy celów. Połączenie eksperymentalnych metod badań terenowych z zaawansowanymi metodami analiz numerycznych, prowadzone dla przypadków niewielkich wolnostojących stacji radiokomunikacyjnych, pozwoliło z zadawalającym przybliżeniem ocenić poziom zagrożenia piorunowego urządzeń podczas bezpośredniego wyładowania w wieżę stacji. Uwzględnione zostały przy tym najistotniejsze zjawiska elektromagnetyczne i falowe, które mogą zachodzić w stacji podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego.

Zastosowane metody analiz wzajemnie się uzupełniają oraz dają możliwość weryfikacji. Opracowane na ich podstawie wytyczne dotyczące budowy modeli numerycznych stacji, umożliwiają realną ocenę zagrożenia piorunowego urządzeń oraz opracowanie optymalnych rozwiązań ochrony odgromowej w podobnych typach obiektów wyłącznie na podstawie analiz numerycznych.

Można więc stwierdzić, że postawione w pracy tezy zostały udowodnione.

Literatura

- [1] Ala G., Di Silvestre M. L.: „*A Simulation Model for Electromagnetic Transients in Lightning Protection Systems*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 44, no. 4, November 2002; pp. 539–553.
- [2] Aleksandrov G. N., Sorokin A. F.: „*A calculation method for the process of lightning volume charge neutralization*”; 21st International Conference on Lightning Protection; Berlin, Germany; 21–25 September 1992; 1.08, pp. 33–38.
- [3] Baba Y., Ishii M.: „*Lightning return-stroke model incorporating current distortion*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 44, no. 3, August 2002; pp. 476–477.
- [4] Baba Y., Ishii M.: „*Numerical Electromagnetic Field Analysis on Lightning Surge Response of Tower with Shield Wire*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 15, no. 3, July 2000; pp. 1010–1015.
- [5] Baba Y., Ishii M.: „*Numerical Electromagnetic Field Analysis of Lightning Current in Tall Structures*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 16, no. 2, April 2001; pp. 324–328.
- [6] Baba Y., Ishii M.: „*Numerical Electromagnetic Field Analysis on Measuring Methods of Tower Surge Impedance*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 14, no. 2, April 1999; pp. 630–635.
- [7] Baba Y., Miyazaki S., Ishii M.: „*Reproduction of lightning electromagnetic field waveforms by engineering model of return stroke*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 46, no. 1, February 2004; pp. 130–133.
- [8] Baba Y., Rakov V. A.: „*On the mechanism of attenuation of current waves propagating along a vertical perfectly conducting wire above ground: application to lightning*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 47, no. 3, August 2005; pp. 521–532.
- [9] Bajorek J., Gamracki M., Maslowski G.: „*Lightning coupling to overhead and buried conductors as frequency response function of the system*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; pp. 274–279.
- [10] Bajorek J., Gamracki M.: „*On the exponential model of standard voltage surge*”; XV International Conference on Electromagnetic Disturbances; Białystok, Poland; 21–23 September 2005; pp. 8.1-1–8.1-6.
- [11] 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; vol. 38, no. 3, August 1996; pp. 265–273.
- [12] Baran I., Berger G.: „*Study of some lightning current’s parameters using cloud-to-ground lightning data*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; pp. 74–79.
- [13] Baran I., Bouquegneau C.: „*Statistical description of lightning current parameters*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; pp. 163–198.
- [14] Barker P. P., Short T. A., Eybert-Berard A. R., Berlandis J. P.: „*Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 11, no. 2, April 1996; pp. 980–991.

- [15] Battini M., Bessi F., Chiti S., Pomponi R.: „*LEMP effects on equipment in telecommunication centers*”; 10th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC; March 1993; pp. 681–686.
- [16] Beierl O.: „*Front shape parameters of negative subsequent strokes measured at the Peissenberg tower*”; 21st International Conference on Lightning Protection; Berlin, Germany, 1992; pp. 19–24.
- [17] Beierl O.: „*Lightning current measurements at the Peissenberg tower*”; 7th International Symposium on High Voltage Engineering; Dresden, Germany, August 26–30 1991; pp. 19–22.
- [18] Bermudez J. L.: „*Lightning currents and electromagnetic fields associated with return strokes to elevated strike objects*”; Rozprawa doktorska; Ecole Polytechnique Federale de Lausanne; 2003.
- [19] Bermudez J. L., Rachidi F., Janischewskij W., Hussein A. M., Shostak V., Rubinstein M., Nucchi C. A., Chang J. S., Joe P., Nyffeler M.: „*On the enhancement of radiated electric and magnetic fields associated with lightning return strokes to tall structures*”; IEEE International Conference on Electromagnetic Compatibility; Montreal, Canada; 2001.
- [20] Bermudez J. L., Rachidi F., Janischewskij W., Hussein A. M., Shostak V., Rubinstein M., Nucchi C. A., Chang J. S., Joe P., Nyffeler M.: „*Simultaneous measurements of electromagnetic fields at two distances and of current associated with lightning return stroke to the CN tower*”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; September 2–6, 2002; pp. 155–160.
- [21] Cooray V.: „*On the concepts used in return stroke models applied in engineering practice*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 45, no. 1; February 2003; pp. 101–108.
- [22] Darveniza M., Flisowski Z., Kern A., Landers E. U., Mazzetti C., Rousseau A., Sherlock J., Lo Piparo G. B.: „*Application problems of the probabilistic approach to the assessment of risk for structures and services*”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; 2–6 September 2002, vol. II, 10b.1, pp. 821–826.
- [23] Dawalibi F. P., Selby A.: „*Electromagnetic fields of energized conductors*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 8, no. 3, July 1993, pp. 1275–1284.
- [24] Dawalibi F., Xiong W., Ma J.: „*Transient Performance of Substation Structures and Associated Grounding Systems*”; IEEE Transaction on Industrial Applications; vol. 31, May/June 1995; pp. 520–527.
- [25] Diendorfer G., Hadrian W., Jobst R.: „*Simulation von Direkten Blitzeinschlägen in den Funkmast von Hochspannungsschaltanlagen: Praktische Durchführung der Messungen*”; 18th International Conference on Lightning Protection; München, 1985; Proc. 3.6, pp. 171–174.
- [26] Feizhou Z., Shanghe L.: „*A new function to represent the lightning return-stroke currents*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 44, no. 4, November 2002, pp. 595–597.
- [27] Flisowski Z., Łoboda M., Szewczyk M.: „*Ocena ryzyka uszkodzenia instalacji i urządzeń technicznych w obiektach budowlanych w wyniku wyladowań piorunowych*”; XI International Conference on Electromagnetic Disturbances; Białystok, Poland; 19–21 September 2001; pp. 5.2-1–5.2-6.
- [28] Flisowski Z., Mazzetti C., Fiamingo F.: „*Hazard for structure equipment due to different components of lightning overvoltages*”; XIV International Conference on Electromagnetic Disturbances; Vilnius, Lithuania; 22–24 September 2004; pp. 9–14.
- [29] Flisowski Z.: „*Trendy rozwojowe ochrony odgromowej budowli*”; Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1986.
- [30] da Frota Mattos M. A.: „*Grounding grids transient simulation*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 20, no. 2, April 2005, pp. 1370–1378.

- [31] Fuchs F.: „*On the transient behavior of the telecommunication tower at the mountain Hoher Peissenberg*”; 24th International Conference on Lightning Protection; vol. 1; Birmingham, UK, 1998; pp. 36–41.
- [32] Geri A., Visacro S. F.: „*Grounding systems under surge conditions: comparison between a field model and a circuit model*”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; September 2–6 2002; pp. 411–416.
- [33] Geri A.: „*Practical Design Criteria of Grounding Systems under Surge Conditions*”; 25th International Conference on Lightning Protection; Rhodes, Greece, 18 – 22 September 2000; Proc. 5.18, pp. 458–463.
- [34] Gomes Ch., Cooray V.: „*Concepts of lightning return stroke models*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 42, no. 1, February 2000; pp. 82–95.
- [35] Grcev L. D.: „*Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 11, no. 2, April 1996; pp. 815–823.
- [36] Grcev L., Arnautovski V.: „*Comparison between Simulation and Measurement of Frequency Dependent and Transient Characteristics of Power Transmission Line Grounding*”; 24th International Conference on Lightning Protection; 1998; Proc. 5a.7.
- [37] Grcev L., Arnautovski V.: „*Transient Voltages Coupling to Cables in Metal Tubes*”; 22nd International Conference on Lightning Protection; Budapest, Hungary, 1994; Proc. R 5-03.
- [38] Guerrieri S., Nucci C. A., Rachidi F., Rubinstein M.: „*On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 13, no. 4, October 1998; pp. 1543–1555.
- [39] Heidler F., Cvetic J. M., Stanic B. V.: „*Calculation of lightning current parameters*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 14, no. 2, April 1999; pp. 399–404.
- [40] Heidler F., Hopf Ch.: „*Lightning current function for LEMP calculation*”; 22nd International Conference on Lightning Protection; Budapest, Hungary 1994; R 4-06.
- [41] Hoidalén H. K.: „*Analytical Formulation of Lightning-Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines above Lossy Ground*”; IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility; vol. 45, no. 1, February 2003; pp. 92–100.
- [42] Hussein A. M., Janischewskij W., Milewski M., Shostak V., Chang J. S., Chisholm W.: „*Return-stroke current waveform parameters of lightning to the CN tower (1992-2001)*”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; September 2–6 2002; pp. 161–166.
- [43] Ishii M., Mischishita K., Hongo Y.: „*Experimental study of lightning-induced voltage on an overhead wire over lossy ground*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 41, no. 1, February 1999; pp. 39–45.
- [44] Jakubowski J. L.: „*Podstawy teorii przepięć w układach energoelektrycznych*”; Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1968.
- [45] Janischewskij W., Shostak V., Barratt J., Hussein A. M., Chang J. S.: „*Collection and use of lightning return stroke parameters taking into account characteristics of the struck object*”; 23rd International Conference on Lightning Protection; Florence, Italy, 1996; pp. 16–23.
- [46] Kern A., Heidler F., Seevers M., Zischank W.: „*Magnetic fields and induced voltages in case of a direct strike – comparison of results obtained from measurements at a scaled building to those of IEC 62305-4*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; pp. 309–314.
- [47] Kodali V., Rakov V. A., Uman M. A., Rambo K. J., Schnetzer G. H., Schoene J., Jerauld J.: „*Triggered-lightning properties inferred from measured currents and very close electric fields*”; Atmospheric Research 76, 2005; pp. 355–376.
- [48] 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; vol. 108, no. D.17, 4542, doi: 10.1029/2003JD003398, 2003; pp. ACL 7-1–7-9.

- [49] Krakowski M.: „*Elektrotechnika teoretyczna; tom II: Pole elektromagnetyczne*”; Państwowe Wydawnictwo Naukowe; Warszawa – Poznań 1979.
- [50] Lebson S., Siedlecki A.: „*Miernictwo elektryczne w zarysie*”; Redakcja Skryptów Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1969.
- [51] Liu Y., Theethai N., Thottappillil R.: „*An engineering model for transient analysis of grounding system under lightning strikes: nonuniform transmission-line approach*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 20, no. 2, April 2005; pp. 722–730.
- [52] Liu Y., Zitnik M., Thottappillil R.: „*An improved transmission-line model of grounding system*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 43, no. 3, August 2001; pp. 348–355.
- [53] Lo Piparo G. B., Belcher J., Gräf W., Kikinger H.: „*The protection of broadcasting installations against damage by lightning*”; Technical monograph, European Broadcasting Union, Technical Centre Brussels.
- [54] Lorenzou M. I., Hatzargyriou N. D.: „*Effective Dimensioning of Extended Grounding Systems for Lightning Protection*”; 25th International Conference on Lightning Protection; Rhodes, Greece, 18 – 22 September 2000; Proc. 5.9, pp. 435–439.
- [55] Lowke J. J.: „*On the physics of lightning*”; IEEE on Plasma Science; vol. 32, no. 1, February 2004; pp. 4–17.
- [56] Łoboda M., Ślusarek S., Kuźmiński M., Flisowski Z.: „*Experiments with voltages induced in installation circuits by discharges simulating those of lightning*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; pp. 326–331.
- [57] Łoboda M., Szewczyk M., Flisowski Z.: „*Lightning risk numerical calculation programme based on draft of new version of IEC 62305-2*”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; 2–6 September 2002; vol. II, 10b.4, pp. 842–846.
- [58] Markowska R.: „*Potential distributions in grounding systems of telecommunication objects struck by lightning*”; IV International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology; St. Petersburg, Russia; 19–22 June 2001; pp. 94–98.
- [59] Markowska R., Augustyniak L. K., Sowa A. W.: „*Transient voltages in electrical installation and cabling due to direct strikes to a building*”; 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2002); Cracow, Poland; 2–6 September 2002; vol. II, pp. 63–640.
- [60] Markowska R., Augustyniak L. K., Sowa A. W.: „*Voltage differences in grounding systems of broadcasting stations during direct lightning stroke*”; 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2002); Cracow, Poland; 2–6 September 2002; vol. I, pp. 338–341.
- [61] Markowska R., Augustyniak L.: „*Properties of power stations’ grounding systems subjected to lightning currents*”; XI International Conference on Electromagnetic Disturbances; Białystok, Poland; 19–21 September 2001; pp. 7.4-1–7.4-4.
- [62] Markowska R., Sowa A. W., Augustyniak L. K.: „*Lightning effects in base stations of global systems for mobile communication*”; International Carpathian Conference on EMC – Protection of Computer Systems against Electromagnetic Disturbances (ICC’02); Łańcut – Rzeszów, Poland; 19–20 September 2002; pp. II.12-1–II.12-4.
- [63] Markowska R., Sowa A. W., Augustyniak L. K.: „*Lightning effects on external and internal cabling in telecommunication centers with towers*”; 26th International Conference on Lightning Protection (ICLP 2002); Cracow, Poland; 2–6 September 2002; vol. II, pp. 568–573.
- [64] Markowska R., Sowa A. W., Augustyniak L. K.: „*Overvoltages and impulse electromagnetic fields in broadcasting stations during direct lightning stroke*”; 16th International Wrocław Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility; Wrocław, Poland; 25–28 June 2002; part 2, pp. 495–500.
- [65] Markowska R., Sowa A. W.: „*Rozległe systemy uziomowe obiektów telekomunikacyjnych*”; Krajowe Sympozjum Telekomunikacji; Bydgoszcz; 12–14 września 2001; t. B, str. 311–318.

- [66] Markowska R., Sowa A. W.: „Systemy uziomowe obiektów radiokomunikacyjnych”; Krajowa Konferencja Radiokomunikacji Radiofonii i Telewizji; Poznań; 14–16 maja 2001; str. 17.2-1–17.2-4.
- [67] Markowska R., Sowa A.: „Proste układy uziomowe – Uziemienia w ochronie odgromowej i przeciwprzebieciowej”; Elektroinstalator nr. 2/2001, str. 60–65.
- [68] Markowska R., Sowa A.: „Rozbudowane systemy uziomowe – Uziemienia w ochronie odgromowej i przeciwprzebieciowej”; Elektroinstalator nr. 3/2001, str. 26–29.
- [69] 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; pp. 11.2-1–11.2-4.
- [70] Markowska R.: „Influence of Distance and Grounding Properties of Transformer Feeding Station on Surge Currents in GSM Base Station”; XV International Conference on Electromagnetic Disturbances; Białystok, Poland; 21-23 September 2005; pp. 1.10-1–1.10-3.
- [71] Markowska R.: „Influence of Ground Resistivity and Detailed Numerical Model on the Level of Lightning Threat during Direct Strike into a Communication Tower”; XV International Conference on Electromagnetic Disturbances; Białystok, Poland; 21-23 September 2005; pp. 3.6-1–3.6-4.
- [72] Markowska R.: „Investigation Methods of LEMP Effects”; XIII International Conference on Electromagnetic Disturbances; Białystok, Poland; 24–26 September 2003; pp. 3.4-1–3.4-6.
- [73] Markowska R.: „Investigation of Lightning Electromagnetic Pulse Effects in GSM Base Station”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13-16 September 2004; pp. 963–968.
- [74] Markowska R.: „Lightning currents and electromagnetic fields in large radio communication centers with towers”; XI International Conference on Electromagnetic Disturbances; Białystok, Poland; 19–21 September 2001; pp. 9.5-1–9.5-6.
- [75] Markowska R.: „Lightning threat of radio communication centres”; XII International Conference on Electromagnetic Disturbances (EMD'2002); Palanga, Lithuania; 25–27 September 2002; pp. 127–132.
- [76] Markowska R.: „Narażenia elektromagnetyczne w stacjach elektroenergetycznych”; Inżynieria Wysokich Napięć; Kiekrz koło Poznania; 22–24 maja 2000; str. 239–244.
- [77] Markowska R.: „Numerical Analyses of Wave Properties of a Communication Tower Subjected to Lightning Current”; XV International Conference on Electromagnetic Disturbances; Białystok, Poland; 21-23 September 2005; pp. 7.4-1–7.4-4.
- [78] Markowska R.: „Problems of Lightning Return Stroke Current Representation in Numerical Analysis”; XIV International Conference on Electromagnetic Disturbances; Vilnius, Lithuania; 22-24 September 2004; pp. 15–18.
- [79] Markowska R.: „Rozkłady napięć na terenie stacji elektroenergetycznych przy przepływie prądów piorunowych w systemach uziomów”; Urządzenia piorunochronne w projektowaniu i budowie; Kraków; 26–27 października 2000; str. 115–122.
- [80] Markowska R.: „Rozpływy prądów piorunowych w konstrukcjach obiektów radiokomunikacyjnych”; Krajowa Konferencja Radiokomunikacji Radiofonii i Telewizji, KKRRiT'02; Gdańsk; 12 – 14 czerwca 2002; str. 309–312.
- [81] Markowska R.: „Zagrożenie piorunowe obiektów radiokomunikacyjnych”; Konferencja Wyładowania atmosferyczne – Systemy Rejestracji i ochrony; Bielsko-Biała; 5–7 czerwca 2002; str. 121–135.
- [82] Markowska R.: „Surge Current Distributions in Base Station of Mobile Communication System”; IEEE International Symposium on EMC; Istanbul, Turkey; 11–16 May 2003; WE-A-P1.9.
- [83] Metwally I. A., Heidler F.: „Evaluation of the lightning shielding performance of overhead power lines by extra ground wires”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; 2–6 September 2002; vol. I, pp. 173–178.

- [84] Michishita K., Ishii M., Asakawa A., Yokoyama S., Kami K.: „*Voltage induced on a test distribution line by negative winter lightning strokes to a tall structure*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 45, no. 1; February 2003; pp. 135–145.
- [85] Milagres T. F. L., Miranda G. C., Paulino J. O. S., Barbosa C. F.: „*The lightning shielding effect of buildings: a reduced model study*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; pp. 332–336.
- [86] Miranda G. C., Paulino J. O. S., Boaventura W. C., Pissolato Filho J.: „*Experimental Study of Lightning Current Distribution in a Telecommunication System*”; 22nd International Conference on Lightning Protection; Budapest, Hungary, 1994; Proc. R 4-10.
- [87] Moini R., Kordi B., Abedi M.: „*Evaluation of LEMP effects on complex wire structures located above a perfectly conducting ground using electric field integral equation in time domain*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 40, no. 2; May 1998; pp. 154–162.
- [88] Montandon E., Beyeler B.: „*Lightning Induced Voltages on Electrical Installations on a Swiss PTT Instrumented Tower in St. Chrischona, Switzerland*”; 22nd International Conference on Lightning Protection; Budapest, Hungary, 1994; Proc. R 4-11.
- [89] Montandon E.: „*Blitzsimulation an Gebäuden Methoden und Resultate verschiedener Untersuchungen*”; 19th International Conference on Lightning Protection; Graz, Austria, 1988; Proc. 6.1, pp. 333–341.
- [90] Nucci C. A., Borghetti A., Piantini A., Janiszewski J. M.: „*Lightning Induced Voltages on Distribution Overhead Lines: Comparison Between Experimental Results from a Reduced-Scale Model and Most Recent Approaches*”; 24th International Conference on Lightning Protection; 1998; Proc. 3b.4.
- [91] Nucci C. A., Rachidi F., Ianoz M. V., Mazzetti C.: „*Lightning-induced voltages on overhead lines*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 35, no. 1, February 1993, pp. 75–86. [33],
- [92] Orlandi A., Mazzetti C., Flisowski Z., Yarmarkin M.: „*Systematic Approach for the Analysis of the Electromagnetic Environment inside a Building during Lightning Strike*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 40, November 1998; pp. 521–535.
- [93] Pan E., Liew A. C.: „*Effect of resistance on lightning return stroke current*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 15, no. 1, January 2000; pp. 135–141.
- [94] Pflüger K., Popp E.: „*Ermittlung der in Kleineren Fernmeldegebäuden zu Erwartenden Blitzüberspannungen durch Simulation von Blitzeinschlägen*”; 18th International Conference on Lightning Protection; München, 1985; Proc. 5.2, pp. 283–289.
- [95] 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.
- [96] Rakov V. A., Uman M. A., Rambo K. J.: „*A review of ten years of triggered-lightning experiments at Camp Blanding, Florida*”; Atmospheric Research 76, 2005; pp. 503–517.
- [97] Rakov V. A.: „*Transient response of a tall object to lightning*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 43, no. 4; November 2001; pp. 654–661.
- [98] Ratnamahilan P., Hoole P.: „*Modeling the lightning earth flash return stroke for studying its effects on earthing systems*”; IEEE Transactions on Magnetics; vol. 29, no. 2, March 1993; pp. 1839–1844.
- [99] Ribeiro J., Le Masson S., Terafi R., Zeddani A.: „*Lightning impact on a telecommunication network: prediction of the surges due to a direct lightning stroke on a tall structure*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; pp. 766–771.
- [100] Rondon D., Silveira F. H., Visacro S.: „*A varying surge impedance transmission line model to evaluate lightning current contamination at tall structures*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; pp. 983–988.

- [101] Schroeder M. A. O., Soares A. Jr., Visacro S. F., Cherchiglia L. C. L., de Souza V. J.: „*Lightning current statistical analysis: measurement of Morro do Cachimbo station - Brazil*”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; September 2–6 2002; pp. 20–23.
- [102] Schroeder M. A. O., Soares A. Jr., Visacro S. F.: „*Contamination of lightning current waves for short towers: electromagnetic model versus TEM approaches*”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; September 2–6 2002; pp. 60–64.
- [103] Selby A., Dawalibi F. P.: „*Determination of current distribution in energized conductors for the computation of electromagnetic fields*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 9, no. 2, April 1994, pp. 1069–1078.
- [104] Shostak V., Janischewskij W., Hussein A. M., Chang J. S., Rachidi F., Bermudez J. L.: „*Modeling of the electromagnetic field associated with lightning return strokes to a complex tall tower*”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; September 2–6 2002; pp. 167–172.
- [105] Shostak V., Janischewskij W., Hussein A. M., Kordi B.: „*Electromagnetic fields of lightning strikes to tall tower: a model that accounts for upward -connecting discharges*”; 25th International Conference on Lightning Protection; Rhodes, Greece, 18 – 22 September 2002; P 1.18, pp. 60–65.
- [106] Silveira F. H., Visacro S. F., De Conti A. R.: „*Lightning effects on the vicinity of elevated structures*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; vol. I, pp. 291–296.
- [107] Silveira F. H., Visacro S. F., De Conti A. R., Soares A. J., Schroeder M. A. O., Vale M. H. M.: „*The influence of transmission line configuration on the amplitude of lightning induced overvoltages*”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; 2–6 September 2002; vol. I, pp. 197–201.
- [108] Sowa A., Markowska R.: „*Dynamic behaviour of grounding systems for telecommunication centres*”; IV International Symposium on Electromagnetic Compatibility and Electromagnetic Ecology; St. Petersburg, Russia; 19–22 June 2001; pp. 90–94.
- [109] Sowa A., Markowska R.: „*Grounding systems of broadcasting stations*”; XI International Conference on Electromagnetic Disturbances; Białystok, Poland; 19–21 September 2001; pp. 7.3-1–7.3-4.
- [110] Sowa A., Markowska R.: „*Potential distribution in grounding systems of broadcasting station during direct lightning stroke*”; XI International Conference on Electromagnetic Disturbances; Białystok, Poland; 19–21 September 2001; pp. 9.7-1–9.7-4.
- [111] Stopa M.: „*Burze w Polsce*”; Prace geograficzne PAN, 34, s. 109; 1962.
- [112] Sunde E. D.: „*Earth conduction effects in transmission systems*”; D. Van Nostrand Company, 1949.
- [113] Taylor J. R.: „*Wstęp do analizy błędu pomiarowego*”; PWN Warszawa 1995.
- [114] Theethayi N., Cooray V.: „*On the representation of the lightning return stroke process as a current pulse propagating along a transmission line*”; IEEE Transactions on Power Delivery; vol. 20, no. 2, April 2005; pp. 823–837.
- [115] Thottappillil R.: „*Electromagnetic pulse environment of cloud-to-ground lightning for EMC studies*”; IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility; vol. 44, no. 1, February 2002; pp. 203–213.
- [116] 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.
- [117] Uman M. A.: „*Natural lightning*”; IEEE Transactions on industry applications; vol. 30, no 3, May/June 1994; pp. 785–790.
- [118] Uman M. A.: „*The lightning discharge*”; Orlando: Academic Press, 1987.

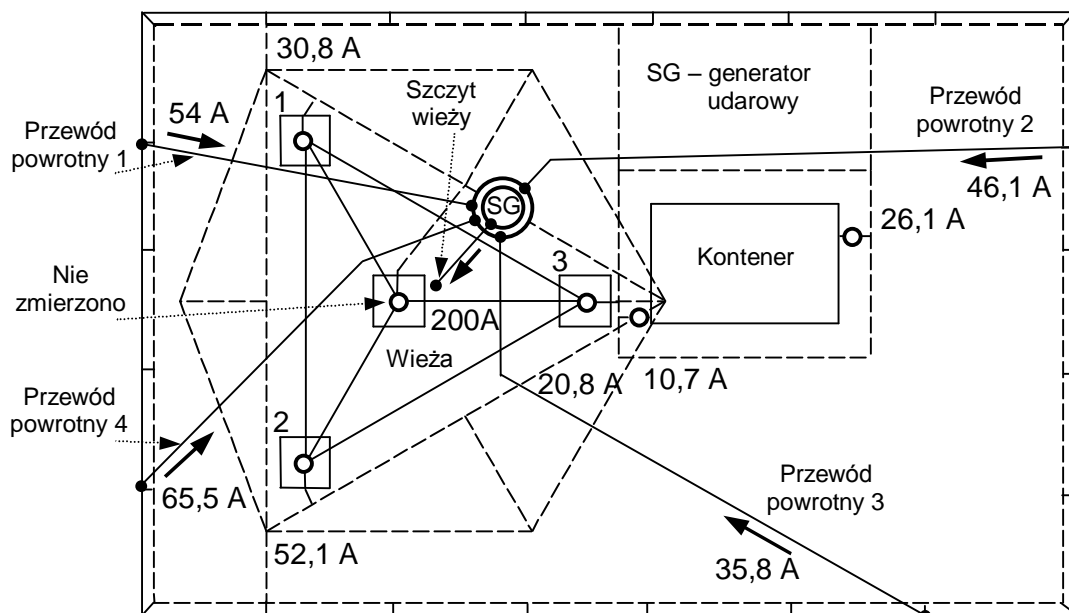
- [119] Visacro S., Silveira F. H., Oliveira R., Felipe M., Silva A., Vale M. H. M.: „*The influence of sensor position on contamination of lightning current waves for measurements taken at short towers*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; pp. 151–156.
- [120] Xiong W., Dawalibi F.: „*Transient Performance of Substation Grounding Systems Subjected to Lightning and Similar Surge Current*”; IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 9, July 1994; pp. 1421–1427.
- [121] Zawadzki P.: „*Prognozowanie przejściowych stanów elektromagnetycznych w instalacjach odgromowych*”; Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 1997.
- [122] Zischank W. J., Metwally I. A., Heidler F., Wiesinger J., Kern A., Seevers M.: „*Laboratory simulation of direct lightning strokes to a modelled building – measurement of magnetic fields and induced voltages*”; 26th International Conference on Lightning Protection; Cracow, Poland; September 2–6, 2002; pp. 591–596.
- [123] Zischank W., Heidler F., Wiesinger J., Stimper K., Kern A., Seevers M.: „*Magnetic fields and induced voltages inside LPZ 1 measured at a 1:6 scale model building*”; 27th International Conference on Lightning Protection; Avignon, France; 13–16 September 2004; pp. 315–320.
- [124] IEC 61312-2: 1999; Protection against lightning electromagnetic impulse (LEMP) – Part 2: Shielding of structures, bonding inside structures and earthing.
- [125] IEC 62305-2, final draft 81/263/FDIS: 2005; Ed. 1.0: Protection against lightning - Part 2: Risk management.
- [126] ITU-T Recommendation K.27 (05/96); Protection against interference: Bonding configurations and earthing inside a telecommunication building.
- [127] ITU-T Recommendation K.40 (10/96); Protection against interference: Protection against LEMP in telecommunications centers.
- [128] PN-EN 55014-2: 1999; Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Wymagania dotyczące przyrządów powszechnego użytku, narzędzi elektrycznych i podobnych urządzeń. Odporność na zaburzenia elektromagnetyczne.
- [129] PN-EN 55024: 2000; Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Urządzenia informatyczne. Charakterystyki odporności. Metody pomiaru i dopuszczalne poziomy.
- [130] PN-ETS 300 342-2: 1999; Urządzenia i Systemy Radiowe (RES). Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) europejskiego cyfrowego komórkowego systemu telekomunikacyjnego (GSM 900 MHz i DCS 1800 MHz). Radiowa stacja bazowa i wyposażenie dodatkowe.
- [131] PN-IEC 61024-1: 2001; Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne.
- [132] PN-IEC 61024-1-1: 2001; Ochrona odgromowa obiektów budowlanych. Zasady ogólne. Wybór poziomów ochrony dla urządzeń piorunochronnych; + Aneks.
- [133] PN-IEC 61312-1: 2001; Ochrona przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym – Zasady ogólne; Polski Komitet Normalizacyjny.
- [134] PN-T-45000-1: 1998; Uziemienia i wyrównywanie potencjałów w obiektach telekomunikacji, radiofonii i telewizji. Wymagania i badania. Terminologia.
- [135] PN-T-45000-2: 1998; Uziemienia i wyrównywanie potencjałów w obiektach telekomunikacji, radiofonii i telewizji. Wymagania i badania. Systemy uziemiające w obiektach telekomunikacji przewodowej.
- [136] „*Computation of electromagnetic fields created by rectilinear current sources in a stratified medium*”; Safe Engineering Services – HIFREQ theory; Materiały niepublikowane.
- [137] „*Earthing and bonding*”; Handbook; Telecommunication Standardization Sector of ITU, 2003.
- [138] „*FFTSES user’s manual*”; Safe Engineering Services & Technologies Ltd.; Montreal, Canada; August 2000.
- [139] „*HIFREQ User’s Manual: Frequency Domain Analysis of Buried Conductor Networks*”; Safe Engineering Services & Technologies Ltd.; Montreal, Canada.

- [140] „HIFREQ user’s manual”; Safe Engineering Services & Technologies Ltd.; Montreal, Canada; August 2000.
- [141] „Lightning transient study of a communication tower; How to... Engineering guide”; Safe Engineering Services & Technologies Ltd; Montreal, Canada; 1999.
- [142] <http://www.sestech.com>
- [143] <http://www.sestech.com/KBase/article.aspx?id=122&cNode=7A1F6Y>
- [144] <http://www.sestech.com/KBase/article.aspx?id=214&cNode=7A1F6Y>
- [145] <http://www.sestech.com/KBase/article.aspx?id=248&cNode=7A1F6Y>
- [146] <http://www.sestech.com/KBase/article.aspx?id=293&cNode=6T5K8S>

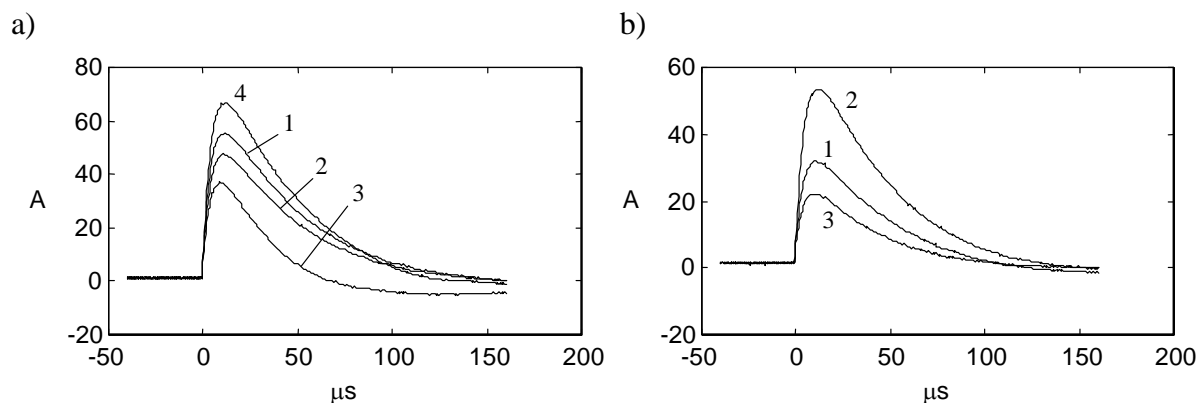
Załącznik: Wyniki pomiarów przeprowadzonych w stacji Goniądz

Seria pomiarowa 1

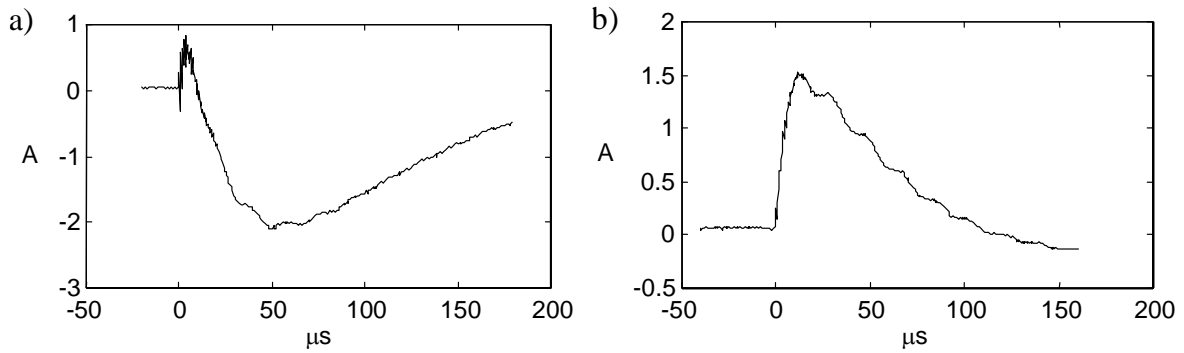
Wyniki pomiarów rozplywu prądów udarowych w przewodach uziomowych oraz w przewodach łączących generator z konstrukcją uzyskane w serii pomiarowej 1 przedstawiono na rys. A.1. Podano wartości szczytowe prądów wpływających do systemu uziomów. Na rysunkach A.2 - A.3 przedstawiono zarejestrowane przebiegi czasowe wybranych prądów.



Rys. A.1. Rozplyw prądów w przewodach uziomowych w stacji oraz w przewodach powrotnych łączących generator z ogrodzeniem stacji (podano wartości szczytowe prądów)

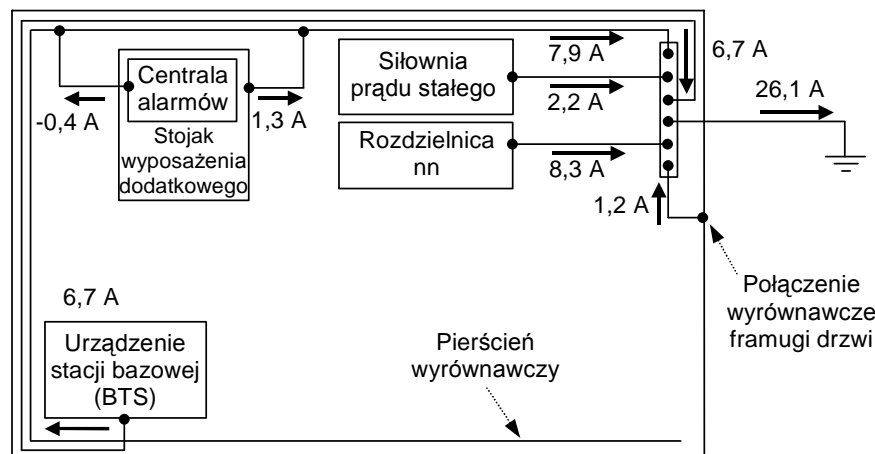


Rys. A.2. Przebiegi prądów zarejestrowane: a) w poszczególnych przewodach powrotnych łączących generator z ogrodzeniem; b) w przewodach uziomowych trzech słupów wspierających wieżę

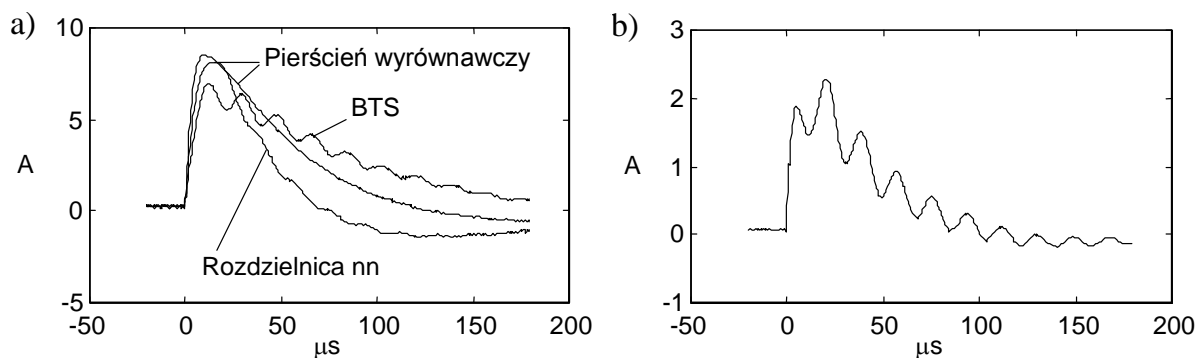


Rys. A.3. Przebiegi prądów w przewodach: a) wyrównawczym łączącym szynę uziemiającą na wieży z szyną przepustów; b) uziemiającym jednego z kabli antenowych

Wyniki pomiarów rozplywu prądów w systemie wyrównywania potencjałów wewnątrz kontenera pokazano na rys. A.4. Tak jak poprzednio, podano wartości szczytowe prądów z zaznaczeniem ich kierunków. Przebiegi czasowe prądów w wybranych elementach instalacji w kontenerze przedstawiono na rys. A.5.



Rys. A.4. Rozplyw prądów w instalacji wyrównywania potencjałów w kontenerze



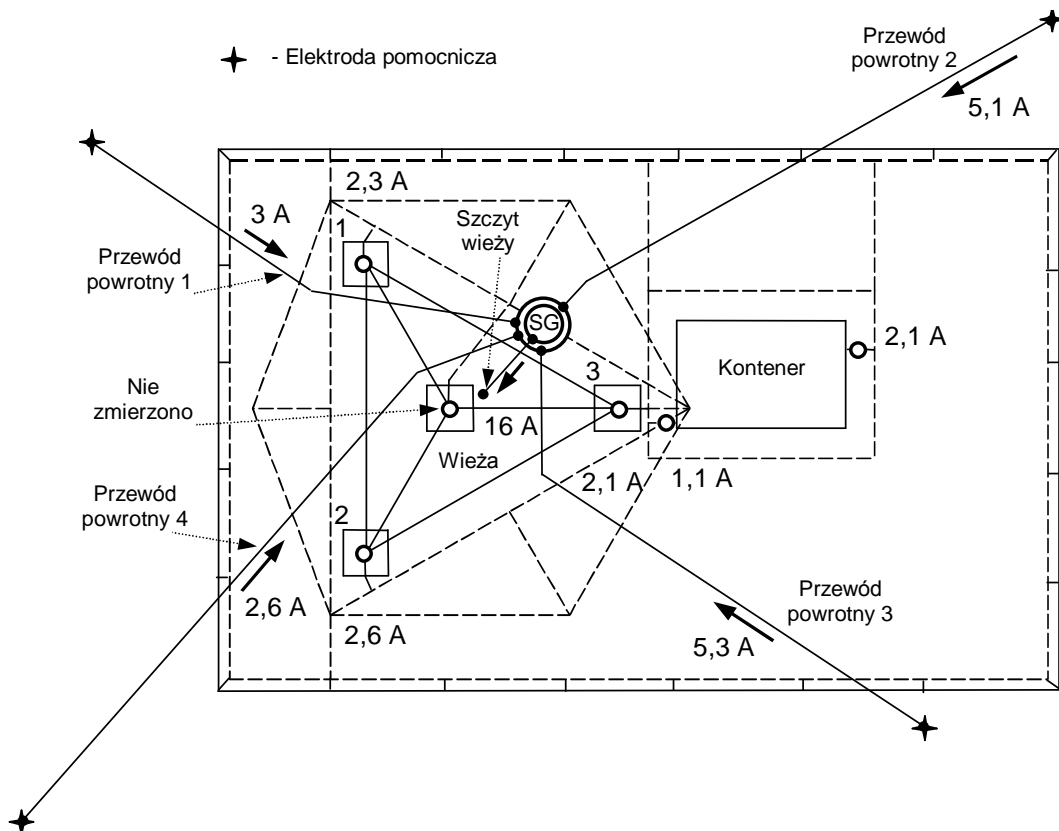
Rys. A.5. Przebiegi prądów udarowych zarejestrowane w przewodach uziemiających: a) urządzenia stacji bazowej (BTS), rozdzielnicy nn i pierścienia wyrównawczego; b) siłowni

Prądy płynące w przewodach uziemiających urządzenia stacji bazowej, siłowni, wyposażenia dodatkowego, a w mniejszym stopniu także rozdzielnicy nn oraz kabli antenowych, charakteryzują się występowaniem oscylacji o częstotliwości 50 - 60 kHz (rys. A.3 b), A.5).

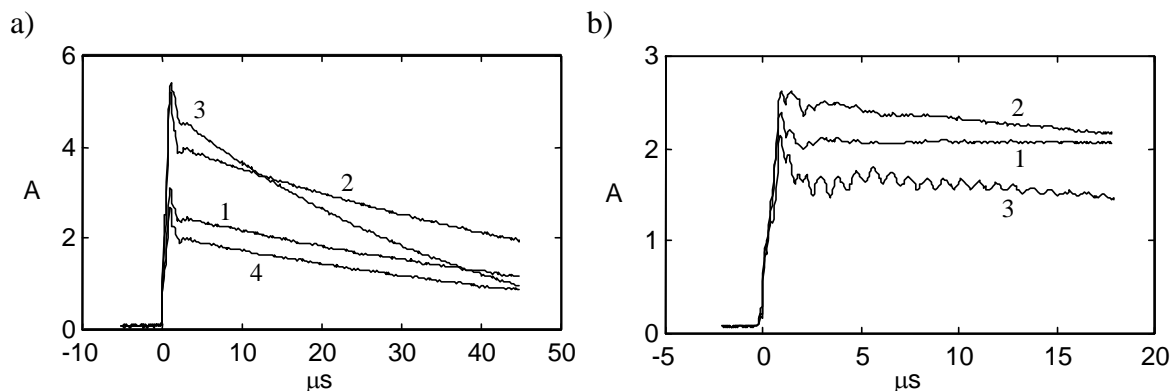
Seria pomiarowa 2

Rozpływ prądów w przewodach uziomowych oraz w przewodach powrotnych odprowadzających prąd udarowy z elektrod pomocniczych do generatora przedstawiono na rys. A.6 (podano wartości szczytowe). Rysunki A.7 i A.8 przedstawiają przebiegi czasowe wybranych prądów zarejestrowanych na zewnątrz kontenera.

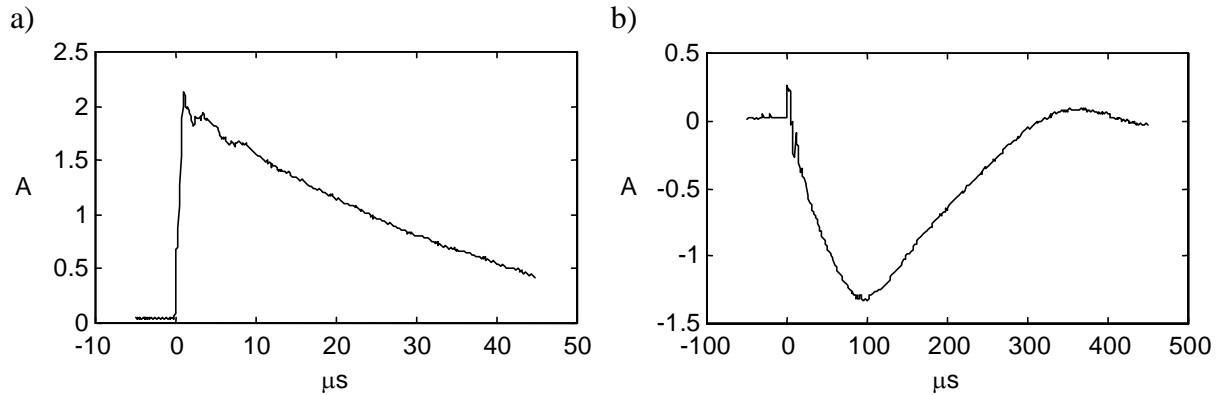
Rozpływ prądów udarowych w systemie wyrównywania potencjałów w kontenerze przedstawiono na rys. A.9 (podano wartości szczytowe prądów), natomiast odpowiednie przebiegi czasowe wybranych prądów zarejestrowane w kontenerze pokazano na rys. A.10.



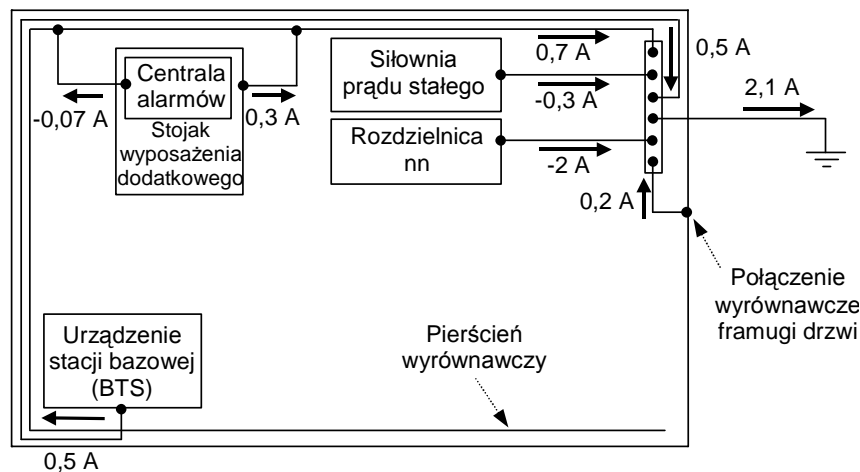
Rys. A.6. Rozpływ prądów udarowych w przewodach uziomowych oraz w przewodach powrotnych łączących generator udarowy z elektrodami pomocniczymi



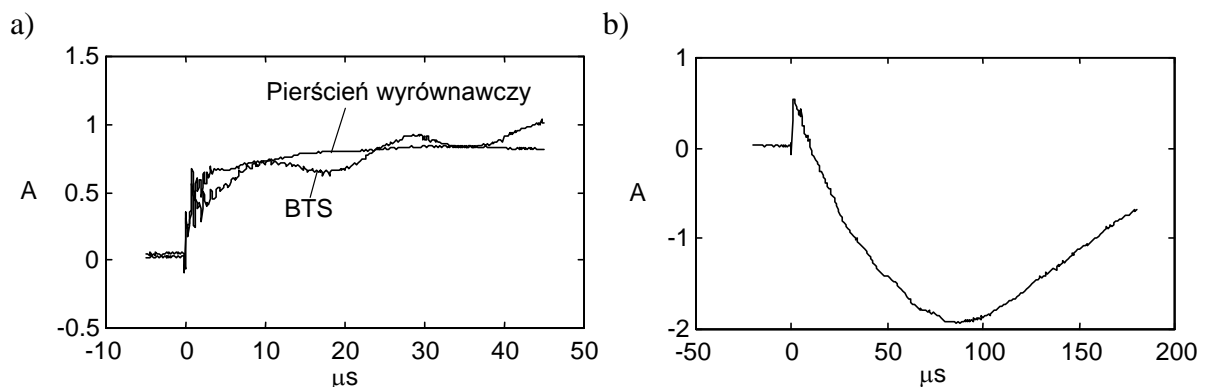
Rys. A.7. Przebiegi prądów zarejestrowane w: a) poszczególnych przewodach powrotnych łączących generator udarowy z elektrodami pomocniczymi; b) przewodach uziomowych trzech słupów wsporczych wieży



Rys. A.8. Przebiegi prądów zarejestrowane w: a) w przewodzie uziomowym szyny technologicznej; b) w przewodzie wyrównawczym łączącym szynę uziemiającą na wieży z szyną przepustów



Rys. A.9. Rozpływ prądów w systemie wyrównywania potencjałów w kontenerze



Rys. A.10. Przebiegi prądów płynących w przewodach uziemiających: a) urządzenia stacji bazowej (BTS) oraz pierścienia wyrównawczego; b) rozdzielnicy nn

W przebiegach prądów zarejestrowanych w przewodach uziemiających urządzenia stacji bazowej, siłowni oraz wyposażenia dodatkowego pojawiają się oscylacje o częstotliwości ok. 50 - 60 kHz (rys. A.10 a)).

Dodatkowo, w niektórych przebiegach prądów zaobserwować można oscylacje o wyższej częstotliwości, ok. 1,1 MHz (np. rys. A.7 b), A.10 a)). Ich źródłem są zjawiska falowe zachodzące w wieży oraz w obwodach doprowadzających/odprowadzających prąd udarowy

do/z obiektu. Wystąpienie wyraźnych oscylacji w tej serii pomiarowej wynika z faktu wprowadzenia do wieży prądu udarowego o krótkim czasie czoła, ok. $1,2 \mu\text{s}$. Okres oscylacji wskazuje, że kolejne fale odbite pojawiały się po czasie ok. $0,45 \mu\text{s}$, co odpowiada przebyciu przez falę poruszającą się z prędkością światła drogi 135 m . Zakładając, że jest to droga, jaką pokonuje fala od punktu obserwacji znajdującego się blisko powierzchni ziemi do punktu odbicia i z powrotem ($2 \cdot 67,5 \text{ m}$), punktem odbicia mógł być wierzchołek wieży. Przy uwzględnieniu dużo niższej prędkości rozchodzenia się fali w gruncie niż w powietrzu (ok. $23,3 \text{ m}/\mu\text{s}$ dla rezystywności gruntu równej $260 \Omega\text{m}$ i częstotliwości 208 kHz , której $1/4$ okresu odpowiada długości czasu narastania czoła prądu udarowego), punktami odbicia mogły być także krańce uziomu i/lub pomocnicze elektrody umieszczone w gruncie oraz uziom stacji transformatorowej.