Rozprawy Naukowe nr 259 BIBLIOTEKA ELEKTROTECHNIKI

Jarosław Michał Wiater

ANALIZA BEZPIECZEŃSTWA PODCZAS DOZIEMNYCH WYŁADOWAŃ PIORUNOWYCH



Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej Białystok 2014 Recenzenci: prof. dr hab. inż. Zbigniew Gacek dr hab. n. med. Paweł Krajewski

Redaktor naukowy: prof. dr hab. inż. Mikołaj Busłowicz, prof. zw.

Redaktor wydawnictwa: Elżbieta Dorota Alicka

Projekt okładki: Agencja Wydawnicza EkoPress / 601 311 838 wykorzystano grafikę antishock

© Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2014

ISSN 0867-096X

Publikacja nie może być w jakikolwiek sposób powielana i rozpowszechniana bez pisemnej zgody właściciela praw autorskich.

Redakcja techniczna, skład i druk: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej

Nakład: 63 egz.

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej ul. Wiejska 45C, 15-351 Białystok tel.: 85 746 91 37, fax: 85 746 90 12 e-mail: oficyna.wydawnicza@pb.edu.pl www.pb.edu.pl

SPIS TREŚCI

W	stęp		. 5
1.	Skutl	ki rażenia człowieka prądem wyładowania piorunowego	10
2.	Char i życ	akterystyka rozwiązań stosowanych do ochrony zdrowia ia ludzkiego podczas wyładowań piorunowych	20
3.	Bezp 3.1. 3.2. 3.3. 3.4. 3.5. 3.6. 3.7. 3.8. 3.9. 3.10	ieczeństwo ludzi podczas wyładowań piorunowych Charakterystyka zastosowanej metody obliczeniowej Model matematyczny Bezpieczeństwo ludzi w pobliżu wolnostojącego masztu Skutki oddziaływania prądów piorunowych na wolnostojące maszty Bezpieczeństwo ludzi przebywających pod drzewami Bezpieczeństwo ludzi przebywających w wodzie Bezpieczeństwo ludzi w sąsiedztwie stacji bazowej GSM Bezpieczeństwo ludzi na terenie stacji elektroenergetycznej WN Bezpieczeństwo ludzi przebywających w sąsiedztwie elektroenergetycznych linii przesyłowych WN Bezpieczeństwo ludzi w pobliżu urządzenia piorunochronnego	23 23 25 31 37 42 51 57 61 65
	3.11. 3.12.	obiektu budowlanego Metody redukcji napięć krokowych 3.12.1. Badania rur osłonowych	70 84 89 90
4.	Pomi 4.1. 4.2. 4.3.	ary napięć rażeniowych w warunkach terenowych Generator WN izolowany od ziemi Pomiary napięć krokowych w sąsiedztwie drzewa Pomiary napięć rażeniowych w pobliżu hali produkcyjnej 1	95 96 98 01
5.	Zagr	ożenie pośrednie podczas wyładowań piorunowych 1	06
Ро	dsum	owanie 1	11
Li	teratu	ra 1	14

Załącznik A	120
Streszczenie	127
Summary	128

WSTĘP

Wyładowania piorunowe w powszechnym odczuciu mają charakter nagły i niespodziewany. W dobie powszechnie dostępnych środków masowego przekazu informacje o porażeniu ludzi oraz szkodach materialnych wywołanych przez wyładowanie piorunowe są szeroko nagłaśniane, co potęguje obawy o zdrowie i życie podczas burzy. Niestety, bardzo często przekazywane informacje nie są prawdziwe i zgodne z wiedzą naukową dotyczącą zagrożeń stwarzanych przez wyładowania piorunowe oraz szeroko pojętych aspektów medycznych. Nierzetelne informacje powodują okresowy i gwałtowny wzrost zainteresowania problematyką bezpieczeństwa podczas doziemnych wyładowań piorunowych, szczególnie, zaś warunkami bezpiecznego zachowania podczas burzy. Ze względu na charakter zachodzących zjawisk sprawa nie zawsze jest jednak prosta i oczywista.

Wypadki związane z porażeniem prądem elektrycznym wywołanym wyładowaniem piorunowym mają miejsce podczas pracy, wypoczynku i wykonywania czynności dnia codziennego. Wiążą się one zawsze z określonymi stratami ekonomicznymi, ludzkimi i społecznymi, a także z pojawiającym się poczuciem strachu.

W celu zmniejszenia strat niezbędne jest zastosowanie odpowiednich rozwiązań technicznych popartych odpowiednimi aktami normatywnymi, dzięki którym można będzie zmniejszyć liczbę zdarzeń katastrofalnych, a w większości przypadków ograniczyć ich skutki.

Działania profilaktyczne powinny opierać się na opracowaniu i wdrożeniu takich rozwiązań technicznych, których działanie w sytuacji ekstremalnej ochroni ludzi przed skutkami doziemnych wyładowań piorunowych, niezależnie od miejsca ich przebywania. Nie można też zapomnieć o profilaktyce pośredniej, która winna obejmować przede wszystkim różnorodne działania informacyjne, propagujące stosowanie rozwiązań technicznych ograniczających zagrożenie piorunowe. Niefrasobliwość oraz błędne postępowanie człowieka w dużej mierze prowadzi do wypadków porażeń, stąd też właściwe wydaje się prowadzenie edukacji młodzieży, począwszy od najmłodszych lat. Odrębnym, ale równie ważnym aspektem zagadnienia jest minimalizacja skutków wypadków związanych z porażeniem prądem poprzez rozpowszechnienie zasad udzielania pierwszej pomocy na miejscu wypadku. Faktem jest wyraźny postęp w dziedzinie ochrony odgromowej obiektów budowlanych, co powoduje zmiany w sposobie podejścia do wielu zagadnień dotyczących bezpieczeństwa podczas wyładowań piorunowych. Należy się więc zastanowić nad wprowadzeniem regulacji prawnych zalecających uczestnictwo w okresowych szkoleniach w zakresie ochrony odgromowej dla osób projektujących i wykonujących urządzenia piorunochronne na nowych budynkach. Dotyczy to zarówno obiektów użyteczności publicznej, domów mieszkalnych, jak i obiektów przemysłowych.

Istnieją również grupy zawodowe, które są szczególnie narażone na skutki wyładowań piorunowych – na przykład rolnicy, pracownicy sezonowi na plantacjach, rybacy, robotnicy budowlani, elektromonterzy. W tym przypadku celowe wydaje się propagowanie podstawowej wiedzy o zasadach zachowania się podczas burzy w postaci materiałów informacyjnych, informacji w środkach masowego przekazu, a nawet dedykowanych szkoleń.

Prawdopodobieństwo zdarzenia niebezpiecznego związanego z doziemnym wyładowaniem piorunowym zależy od lokalizacji na obszarze kraju. Na rysunku 0.1 przedstawiono gęstość wyładowań piorunowych w roku 2010 na obszarze Polski.



Rysunek 0.1. Roczna gęstość wyładowań piorunowych w Polsce w 2010 roku [101]

Wynika stąd, że południowa część kraju jest bardziej narażona na wyładowania piorunowe niż północna. Dostępne statystyki wyraźnie pokazują, że liczba wypadków związanych z wyładowaniami piorunowymi kształtuje się w latach 2001–2006 na podobnym poziomie i nie obserwuje się tendencji spadkowej. Ma ona charakter po części losowy, związany z liczbą burz występujących w danym roku. W tabelach 0.1 i 0.2 zestawiono z kolei dane statystyczne dotyczące liczby osób, które zostały porażone prądem doziemnego wyładowania piorunowego.

Tabela 0.1. Zarejestrowane i oszacowane liczby ofiar porażeń wskutek wyładowań piorunowych w Polsce w latach 2001–2006 wg Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) i archiwum "Gazety Wyborczej" (GW) [7]

	Porażenia	smiertelne	Szacunkowa liczba	Ofiary, które	Szacunkowa liczba wszystkich ofiar	
Rok	wg GUS	wg GW	ofiar porażeń, które przeżyły wg GUS	przeżyły wg GW		
2001	17	11	17	36	53	
2002	12	6	5	10	22	
2003	10	5	4	8	18	
2004	11	3	23	48	59	
2005	7	4	8	17	24	
2006	3	2	4	8	11	
Suma	60	31	61	127	187	
Średnia	10	5	10	21	31	

Tabela 0.2. Liczba wszystkich osób porażonych prądem piorunowym w poszczególnych miesiącach w latach 2001–2006 (GW) [7]

Missiaa	Ofiary śmiertelne		Ofiary porażeń	Razem		
wnesiąc	Liczba	%	Liczba	%	Liczba	%
Maj	1	3	5	7	6	7
Czerwiec	10	32	24	33	34	37
Lipiec	12	39	22	34	34	38
Sierpień	5	16	7	10	12	11
Wrzesień	3	10	3	5	6	7
Suma	30	100	61	100	92	100

Aby próbować rozwiązać problemy związane z bezpieczeństwem podczas doziemnych wyładowań piorunowych, należy dysponować niezbędnymi informacjami, dotyczącymi:

- skutków rażenia ludzi krótkotrwałymi, jednokierunkowymi impulsami prądu,
- rozkładami napięć krokowych i dotykowych podczas bezpośrednich uderzeń pioruna w rozmaite budowle lub w ich bliskie sąsiedztwo,

- wiedzą na temat eliminowania lub przynajmniej zmniejszenia zagrożenia stwarzanego przez prąd piorunowy,
- wiedzą o zagadnieniach związanych z ochroną odgromową obiektów i obszarów, w których przebywają ludzie.

Dostępną literaturę poświęconą zagadnieniom związanym z bezpieczeństwem ludzi podczas wyładowań piorunowych można podzielić na kilka grup tematycznych.

Pierwsza, najbardziej liczna, odnosi się do szczegółowych opisów przypadków porażeń w następstwie wyładowań piorunowych [17][22][27][29][35][38][40][48] [49][54][68] [73]. Do drugiej grupy można zaliczyć publikacje naukowe poruszające szeroko rozumiany problem bezpieczeństwa podczas wyładowań piorunowych. Opisano w nich proste metody wyznaczania rozkładu potencjałów na powierzchni ziemi podczas przepływu prądów udarowych [20][57][61][74][78]. Metody te można wykorzystywać w obliczeniach o nieskomplikowanym ukształtowaniu, naturalnych i sztucznych systemów uziomowych biorących udział w rozpływie prądu piorunowego. Wyniki takich obliczeń znajdują się w wielu publikacjach, w których wykorzystując metodę elementów o parametrach skupionych, wyznaczano wartości napięć rażeniowych podczas wyładowań piorunowych [2][18][24] [25][37][64][72][75]. Przytoczone przykłady nie pozwalają na uogólnienie problemu, choćby tylko ze względu na konieczność wyznaczenia konkretnych wartości elementów biernych użytych w procesie modelowania.

Trzecia grupa prac koncentruje się na modelowaniu ciała ludzkiego wykorzystywanym w celu przeprowadzenia analizy bezpieczeństwa podczas wyładowań piorunowych. Analizując informacje zawarte w literaturze, można zauważyć dwie wyraźne tendencje w procesie modelowania. Pierwsza polega na tym, aby koncentrować się na modelu ciała ludzkiego stworzonym z elementów biernych o parametrach skupionych [68] [69]. Druga tendencja przejawia się w zastosowaniu tzw. voxel'i (w układzie trójwymiarowego odwzorowania ciała ludzkiego), które są odpowiednikiem pikseli w układzie dwuwymiarowym [37]. Pozwala to na wyznaczenie drogi rozpływu prądu piorunowego w ciele człowieka. Niestety, w metodzie tej nie uwzględniono przestrzennego systemu uziomowego (naturalnego i sztucznego), który stanowi najistotniejszy element funkcjonalny instalacji odgromowej, znajdującej się na drodze rozpływającego się prądu piorunowego.

Należy również wspomnieć o pracach prowadzonych pod kierownictwem prof. Z. Flisowskiego w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku [4][5][36], w których szczegółowo przeanalizowano przyczyny porażeń śmiertelnych i prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia zagrażającego życiu. Na podstawie danych literaturowych próbowano określić poziomy napięć rażeniowych, przy których może wystąpić migotanie (fibrylacja) komór serca. Uzyskane wyniki są wykorzystywane w analizach wykonywanych w niniejszej monografii.

Podsumowując, można stwierdzić, że dostępna literatura na temat bezpieczeństwa podczas wyładowań piorunowych nie jest zbyt liczna, a kilkadziesiąt dostępnych pozycji nie wyczerpuje tematu. Widoczny jest brak opracowań bazujących na rzeczywistych wynikach pomiarów napięć rażeniowych spowodowanych rozpływem rzeczywistych prądów piorunowych, jak i prądów udarowych wytwarzanych przez generatory wysokiego napięcia. Brak jest również wyników obliczeń napięć rażeniowych na terenie obiektów użyteczności publicznej, przemysłowych itp.

Dotychczas nie opracowano skutecznych metod przeciwdziałania lub przynajmniej zmniejszenia skutków oddziaływania wyładowań piorunowych na organizm ludzki. Głównym zadaniem niniejszej monografii jest analiza bezpieczeństwa ludzi podczas doziemnych wyładowań piorunowych w różnych, możliwych do przewidzenia sytuacjach. Przedmiotem rozważań są między innymi metody ograniczania napięć rażeniowych. W tym zakresie monografia może być przydatna dla projektantów obiektów, które są szczególnie narażone na skutki bezpośredniego doziemnego oddziaływania wyładowania piorunowego – stacji elektroenergetycznych, obiektów radiokomunikacyjnych, stacji bazowych telefonii komórkowej GSM oraz obiektów użyteczności publicznej, w których podczas burz mogą przebywać ludzie.

1. SKUTKI RAŻENIA CZŁOWIEKA PRĄDEM WYŁADOWANIA PIORUNOWEGO

Porażenie prądem doziemnego wyładowania piorunowego może być skutkiem bezpośredniego uderzenia pioruna w człowieka lub też może być spowodowane przepływem prądu przez rozmaite przedmioty lub elementy znajdujące się w bezpośrednim sąsiedztwie. W celu prawidłowego zrozumienia omawianych problemów należy na wstępie zdefiniować przynajmniej kilka podstawowych pojęć stosowanych w literaturze przedmiotu.

Przytoczone definicje pochodzą z publikacji zajmujących się problemem zagrożenia wytwarzanym przez aparaty i urządzenia zasilane z sieci elektroenergetycznej i ochrony od porażeń prądem elektrycznym (rys. 1.1). Mają one również zastosowanie w analizach bezpieczeństwa podczas doziemnych wyładowań piorunowych. Należy zauważyć, że dotychczasowe analizy bezpieczeństwa porażenia prądem elektrycznym w głównej mierze dotyczyły zdarzeń występujących przy pracy z urządzeniami podłączonymi do sieci elektroenergetycznej (rys. 1.1).



Rysunek 1.1. Napięcia dotykowe i krokowe wg [82]

Napięcie dotykowe jest definiowane jako różnica potencjałów między dwoma punktami, które mogą być dotknięte dwiema częściami ciała, na przykład rękastopa lub ręka-ręka. W stanie normalnej pracy punkty te, nie są częścią obwodu elektrycznego [1][6][8]. W typowym przypadku porażenia prądem elektrycznym wartości napięć dotykowych zależą od napięcia znamionowego urządzenia oraz rezystancji między obudową urządzenia i ziemią (rys. 1.1). Twierdzenie to jednak jest prawidłowe pod warunkiem, że do układu nie zostaną dołączone dodatkowe źródła energii elektrycznej. Wartości napięć dotykowych kształtują się zupełnie inaczej podczas wyładowań piorunowych, które stanowią dodatkowe źródło wymuszenia, a do porażenia może dojść w wyniku dotknięcia elementu nie będącego w stanie ustalonym częścią obwodu elektrycznego, na przykład metalowego elementu konstrukcyjnego obiektu.

Rozpatrując przypadek porażenia na skutek napięcia dotykowego, należy pamiętać, że wyróżnia się umownie dwa rodzaje dotyku: tzw. dotyk bezpośredni i dotyk pośredni [8]. Pod pojęciem dotyku bezpośredniego należy rozumieć dotknięcie przez człowieka części czynnych, czyli przewodu lub części przewodzącej urządzenia, która może się znaleźć pod napięciem warunkach normalnej pracy [8]. Dotyk pośredni oznacza dotknięcie przez człowieka części przewodzących dostępnych, które znalazły się pod napięciem w wyniku uszkodzenia izolacji [8]. Należy również mieć na uwadze, że podczas wyładowań piorunowych pod napięciem mogą się również znaleźć części nie będące ani częścią urządzenia, ani instalacji elektrycznej (metalowe konstrukcje, rurociągi, przewodzące podłogi i ściany); są to tzw. części przewodzące obce [8].

Napięcie krokowe jest definiowane jako różnica potencjałów dwóch punktów na podłożu, które są odległe od siebie o długość kroku równą 1 m (rys. 1.1). W przypadku wyładowań piorunowych im bliżej jest punktu spływu prądu piorunowego do ziemi, tym wartość napięcia krokowego jest większa. Dotyczy to zarówno napięcia krokowego, jak i dotykowego [1],[6],[8]. Niemniej jednak konkretne wartości napięć rażeniowych i ich rozkłady będą decydować o skali zagrożenia, co jest przedmiotem szczegółowych rozważań w monografii.

Podczas stanów awaryjnych w systemie elektroenergetycznym lub wyładowań piorunowych na skutek powstania napięć krokowych lub dotykowych, może dojść do przepływu prądu rażeniowego przez ciało człowieka [1],[6],[8]. Napięcie rażeniowe dotykowe jest definiowane jako spadek napięcia na impedancji ciała człowieka przy przepływie przez ciało prądu rażeniowego na drodze ręka-stopa, ręka-ręka. Napięcie rażeniowe krokowe jest definiowane jako spadek napięcia na impedancji ciała człowieka przy przepływie przez ciało prądu rażeniowego na drodze ręka-stopa, ręka-ręka.

Podczas doziemnego wyładowania piorunowego wyróżnia się cztery podstawowe mechanizmy rażenia [4][5][6][11][36]:

Lp.	Rodzaj mechanizmu rażenia
1.	Porażenie wskutek bezpośredniego wyładowania piorunowego w człowieka, kiedy cały prąd piorunowy rozpływa się w ciele i poprzez ciało dalej w ziemi (rys. 1.2a).
2.	Porażenie na skutek dotknięcia elementu, który bierze czynny udział w odprowadzeniu prądu wyładowania piorunowego do ziemi (rys. 1.2b).
3.	Porażenie wskutek przeskoku iskrowego lub odgałęzienia głównego kanału wyładowania na osobę stojącą w jego bliskim sąsiedztwie, np. podczas wyładowania w drzewo. Wówczas następuje przeskok w warstwie powietrza między pniem drzewa a człowiekiem, przez którego płynie tylko część prądu wyładowania głównego, powodując jednak porażenie śmiertelne lub poparzenia powierzchni ciała (rys. 1.2c).
4.	Porażenie napięciem krokowym w bliskim sąsiedztwie miejsca, w którym wystąpiło doziemne wyładowanie piorunowe. Im bliżej punktu spływu prądu oraz im bardziej rozstawione są stopy, tym większa różnica potencjałów odkłada się na ciele porażonego (rys. 1.2d).



Rysunek 1.2. Mechanizm rażenia w wyniku: a) bezpośredniego wyładowania, b) napięcia dotykowego, c) przeskoku iskrowego, d) napięcia krokowego [6][11]

Człowiek znajdujący się w wymienionych sytuacjach jest potencjalnie narażony na skutki przepływu prądu elektrycznego. W celu dokładnego zrozumienia zachodzących zjawisk trzeba prześledzić zmiany naturalnych reakcji fizjologicznych człowieka w zależności od częstotliwości i kształtu prądu. Należy jednak pamiętać, że w przypadku doziemnego wyładowania piorunowego czas trwania rażenia jest na ogół wielokrotnie krótszy od czasu przyjmowanego dla prądu przemiennego, szczególnie o częstotliwości sieciowej.

Większość tragicznych w skutkach wypadków z udziałem prądu elektrycznego jest wynikiem bezpośredniego porażenia [8]. Prąd przepływający przez ciało człowieka może w nim wywołać takie zmiany, jak: znamiona prądowe, oparzenia, uszkodzenia oczu, uszu, mrowienia, uczucie ciepła, skurcze mięśni i migotanie komór serca [8].

W przypadku najbardziej rozpowszechnionej częstotliwości 50 Hz przepływ prądu elektrycznego o wartości skutecznej poniżej 0,5 mA nie powoduje u człowieka jakichkolwiek odczuć i reakcji. Jest to tzw. wartość progowa prądu odczuwania lub percepcji [1][8]. Kolejnym progiem jest graniczna wartość prądu samouwolnienia równa 10 mA [79].

Na rysunku 1.3 znajdują się krzywe graniczne specyficznych reakcji organizmu ludzkiego, stwierdzone przy przepływie prądu przemiennego o częstotliwości mieszczącej się w przedziale 15...100 Hz na drodze rażenia lewa ręka-stopy.



Rysunek 1.2. Krzywe graniczne specyficznych reakcji organizmu ludzkiego przy przepływie prądu przemiennego o częstotliwości 15–100 Hz na drodze rażenia lewa ręka-stopy [79] Oznaczenia: $t_r - czas$ rażenia, $I_r - prąd$ rażenia, a – próg prądu percepcji, b – próg samouwolnienia, c – próg migotania komór serca (c₁ – prawdopodobieństwo 5%, c₂ – prawdopodobieństwo 50%, c₃ – prawdopodobieństwo powyżej 50%)

W normie [79] wprowadzono współczynnik korekcyjny, który pozwala zwiększyć lub zmniejszyć rozważane progi w zależności od drogi rażenia [79]. Wartości współczynnika korekcyjnego zawiera tabela 1.1.

Tabela 1.1.	Wartości	współczynnika	korekcyjnego	W	zależności	od	drogi	przepływu	prądu	rażenio-
wego [79]										

Droga przepływu prądu	Współczynnik korekcyjny F	Droga przepływu prądu	Współczynnik korekcyjny F	
Lewa dłoń – lewa stopa	1,0	Plecy – prawa dłoń	0,3	
Lewa dłoń – prawa stopa	1,0	Plecy – lewa dłoń	0,7	
Lewa dłoń – obie stopy	1,0	Pierś – prawa dłoń	1,3	
Obie dłonie – obie stopy	1,0	Pierś – lewa dłoń	1,5	
Lewa dłoń – prawa dłoń	0,4	Pośladki – lewa dłoń	0,7	
Prawa dłoń – lewa stopa	0,8	Pośladki – prawa dłoń	0,7	
Prawa dłoń – prawa stopa	0,8	Pośladki – obie dłonie	0,7	
Prawa dłoń – obie stopy	0,8	Stopa – stopa	0,04	

Dla częstotliwości powyżej 100 Hz wprowadza się tzw. współczynnik częstotliwości F_f [79]:

$$F_{f} = \frac{I_{f}}{I_{f50}},$$
 (1.1)

gdzie:

 I_f – wartość progowa prądu o częstotliwości f,

*I*_{f50} – wartość progowa prądu o częstotliwości 50 Hz.

Zależność współczynnika F_f od częstotliwości mieszczących się w przedziałach 50...1000 Hz i 1...10 kHz przestawiają odpowiednio rysunki 1.4–1.7. Analizując znajdujące się na nich charakterystyki, można dojść do wniosku, że wraz ze wzrostem częstotliwości znacząco wzrasta również próg percepcji. Dla częstotliwości powyżej 100 kHz pierwszym objawem oddziaływania prądu elektrycznego nie jest mrowienie, lecz uczucie ciepła w miejscu styku dłoni z elementem pod napięciem. Dalszy wzrost prądu rażenia powoduje oparzenia skóry [1].

Kontynuując rozważania dla wyższych częstotliwości prądów rażeniowych, dochodzi się do skutków rażenia człowieka krótkotrwałymi, jednokierunkowymi impulsami prądu, jakie mogą wystąpić podczas doziemnego wyładowania piorunowego.



Rysunek 1.4. Zmiany wartości progowych percepcji i samouwolnienia dla częstotliwości 50...1000 Hz [79]; ______ krzywa percepcji, ---- krzywa samouwolnienia



Rysunek 1.5. Zmiany wartości progowych migotania komór serca dla częstotliwości 50...1000 Hz przy rażeniu na drodze ręka-stopa; czas rażenia dłuższy niż 1 cykl pracy serca [79]



Rysunek 1.6. Zmiany wartości progowych percepcji dla częstotliwości 1...10 kHz [79]



Rysunek 1.7. Zmiany wartości progowych samouwolnienia dla częstotliwości 1...10 kHz [79]

W życiu codziennym do porażeń prądami impulsowymi może dojść tylko w wyjątkowej sytuacji, na przykład w wyniku uszkodzenia obudowy urządzenia elektrycznego zawierającego w środku generatory szybkozmiennych impulsów o kształcie prostokątnym, wykładniczym (rozładowanie pojemności użytych w urządzeniu) lub sinusoidalnym [1][79].

Dla krótkotrwałych impulsów głównym czynnikiem powodującym bardzo niekorzystne reakcje fizjologiczne w organizmie jest ładunek elektryczny skumulowany w impulsie prądowym I_t lub zawarta w nim energia (I^2t) ([1][79]).



Rysunek 1.8. Różne kształty impulsów prądowych: a) prostokątny, b) sinusoidalny, c) wykładniczy

W normie [79] zdefiniowano minimalną wartość iloczynu I^2t , zwaną energią fibrylacji F_e , która w określonych warunkach może wywołać migotanie komór serca [79]:

$$F_{e} = \int_{0}^{t_{i}} i^{2} dt$$
 (1.2)

oraz ładunek fibrylacji:

$$F_q = \int_0^{t_i} i \, dt \,. \tag{1.3}$$

Wystąpienie fibrylacji (migotania) komór serca zależy od drogi rażenia i fazy pracy serca. Na podstawie wzorów (1.2) i (1.3) i wytycznych normy [79] można wyznaczyć wartości prądów udarowych, które należy uznać za niebezpieczne dla człowieka podczas wyładowań piorunowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań na zwierzętach stwierdzono [79], że migotanie komór serca występuje w przypadkach krótkich czasów rażenia $t_i < 10$ ms tylko wtedy, gdy początek rażenia jest zbieżny z fazą nadwrażliwości mięśnia sercowego (załamek *T* na obrazie EKG, tzw. strefa ranliwa). Stwierdzono również, że po przekroczeniu energii fibrylacji F_e występuje inicjacja migotania komór serca, gdy $t_i < 10$ ms, bez względu na fazę nadwrażliwości serca [79]. Najważniejszym wnioskiem z tych badań jest to, że podczas wyładowań piorunowych rażenie prądem udarowym o energii fibrylacji większej niż F_e spowoduje migotanie komór serca.

Na rysunku 1.9 zamieszczono krzywe ryzyka fibrylacji dla prądu rażeniowego na drodze ręka-stopa dla różnych poziomów prawdopodobieństwa (c₁ – fibrylacja nie występuje, c₂ – prawdopodobieństwo fibrylacji 5%, c₃ – prawdopodobieństwo fibrylacji 50%). Przyjmując, że rezystancja ciała człowieka wynosi 1 k Ω , graniczna wartość napięcia dotykowego nie powodująca fibrylacji komór serca – dla prądu piorunowego pierwszego wyładowania głównego o kształcie 10/350 µs – wynosi 2 kV (rys. 1.9).



Rysunek 1.9. Krzywe graniczne migotania komór serca dla drogi rażenia ręka-stopa [79]: $t_i < 10 \text{ ms} - \text{czas rażenia}, I' - wartość skuteczna prądu rażeniowego$

Na podstawie zaleceń zawartych w normie [79] i [68], po przeliczeniu zgodnie z wartościami współczynnika korekcyjnego w zależności od drogi przepływu prądu rażeniowego (stopa-stopa), otrzymano zależność opisującą dopuszczalną wartość napięcia krokowego w zależności od czasu trwania rażenia. Dla prądu piorunowego 10/350 μ s wartość progowa napięcia krokowego powodująca migotanie komór serca wynosi 25 kV (prąd rażeniowy 1 A, współczynnik korekcyjny *F* = 0,04) [71].

Charakterystyczną cechą rażenia prądem impulsowym jest to, że nie można określić wartości progowej prądu samouwolnienia. Wyznaczane są tylko wartości progu odczuwania i doznania bólu. Doznanie bólu definiuje się wg [79] jako "zdecydowanie nieprzyjemne uczucie, zbliżone do użądlenia pszczoły lub przypadkowego oparzenia papierosem, które badany niechętnie godzi się przeżyć drugi raz podczas testów". Próby prowadzono na ochotnikach, używając do tego celu kondensatorów o określonej pojemności *C*, naładowanych do napięcia U_c w chwili t=0 (początek rażenia), co przekładało się na określoną energię ich rozładowania *W*. Empiryczne krzywe opisujące wyniki doświadczeń przedstawiono na rysunku 1.10.



Rysunek 1.10. Empiryczna charakterystyka progu odczuwania (obszar A) i progu bólu (obszar B) podczas rozładowywania kondensatorów (o różnych pojemnościach i napięciach w chwili t = 0) przez organizm człowieka [79]: Q – ładunek elektryczny, U_c – napięcie, do którego ładowano kondensatory

W literaturze można znaleźć dopuszczalne wartości napięcia krokowego podane przez Neuhausa [62] (rys. 1.11). Niestety, nie podano źródeł, na podstawie których wyznaczono taką zależność. Podążając za przyjętą przez Neuhausa charakterystyką i założeniem, że całkowity czas trwania rażenia dla udaru piorunowego wynosi 500 µs, odczytana graniczna wartość napięcia krokowego uznana za bezpieczną wynosi 15 kV. Jest więc ona zdecydowanie mniejsza od wartości wyznaczonej na podstawie wymagań [79].



Rysunek 1.11. Dopuszczalne wartości napięć krokowych U_k w zależności od czasu ich trwania t_k wg Neuhausa [62]

Tabela 1.2. Progi napięć krokowych i dotykowych, powyżej których może dojść do migotania komór serca

Źródło danych	Napięcie krokowe [kV]	Napięcie dotykowe [kV]
wg IEC 479 [79]	25	2
wg Neuhausa [62]	15	-
wg Dalziela [30][31]	32,4	_
Symulacja przepływów w ciele człowieka [97]	26,6	_
wg Z. Flisowskiego [5]	24	10

W tabeli 1.2 zestawiono wszystkie dostępne w literaturze graniczne progi napięć krokowych i dotykowych. W dalszych rozważaniach jako poziom bezpieczny przyjęto najniższą spotykaną wartość napięcia krokowego, równą 15 kV, i napięcia dotykowego 2 kV.

2. CHARAKTERYSTYKA ROZWIĄZAŃ STOSOWANYCH DO OCHRONY ZDROWIA I ŻYCIA LUDZKIEGO PODCZAS WYŁADOWAŃ PIORUNOWYCH

W latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku w literaturze krajowej zaproponowano wiele rozwiązań, które miały zapewniać ochronę osobistą ludzi od skutków bezpośrednich wyładowań piorunowych. Żadna z tych propozycji nie znalazła zastosowania w praktyce (rys. 2.1) [13][14].



Rysunek 2.1. Propozycje prof. S. Szpora rozwiązań osobistej ochrony odgromowej [14]: a) dwóch osób stojących obok siebie, b) piechura, c) wspinacza górskiego, d) rowerzysty, e) spacerowiczów, f) namiotu turystycznego

Dodatkowo wyrażono nawet opinię, że część rozwiązań przedstawionych na rysunku 2.1 będzie "przyciągała pioruny" i zwiększała zagrożenie.

Obecnie, stosownie do wymagań norm serii PN–EN 62305 [85], zaleca się – aby dobierając odpowiednie rozwiązania urządzenia piorunochronnego, zwracać uwagę na ochronę ludzi przed porażeniem na skutek wystąpienia napięć krokowych i dotykowych [3][11][12]. W tym celu uziom odgromowy musi spełniać przytoczone w normie wymagania, dotyczące minimalnych długości, w zależności od przyjętego poziomu ochrony i rezystywności gruntu (uziom typu A), oraz średniego promienia obszaru objętego uziomem (typu B). Jeśli pojedynczy uziom otokowy nie zapewnia założonych wymagań lub też różnice potencjałów będą niebezpieczne dla osób przebywających w sąsiedztwie uziomu, należy zastosować dodatkowe uziomy otokowe umieszczane we wzajemnej odległości około 3 metrów. W miarę oddalania się od obrysu obiektu otoki powinny być układane coraz głębiej w ziemi. Przykład takiego rozwiązania przedstawiono na rysunku 2.2.

Należy również zauważyć, że w normie [85] ograniczono się tylko do stwierdzenia, że przedstawione wielootokowe rozwiązania należy stosować wtedy, gdy poziom zagrożenia przekroczy wartości dopuszczalne. Problem tkwi w tym, że nie podano żadnych wartości dopuszczalnych (bezpiecznych).

Dodatkowo w normie [85] zaproponowano sprawdzenie kilku warunków, których spełnienie ogranicza zagrożenie piorunowe związane z napięciami krokowymi i dotykowymi do odpowiednich poziomów, bliżej w normie nie zdefiniowanych. Jeśli zalecane warunki nie są spełnione, należy zastosować proste rozwiązania zapewniające ochronę przed napięciami rażeniowymi, które zostały wywołane przez rozpływający się prąd wyładowania piorunowego (rys. 2.3).



Rysunek 2.2. Zalecane sposoby zmniejszenia rezystancji uziomu [11]



Rysunek 2.3. Rozwiązania ochrony przed napięciem dotykowym i krokowym proponowane w normie [85],[12]

W normie [85] zwraca się również uwagę na groźną sytuację, która może zaistnieć podczas doziemnych wyładowań piorunowych, a polega ona na tym, że – pomimo spełnienia wymagań normatywnych w zakresie doboru rozwiązań ochrony odgromowej – istnieje zagrożenie dla życia ludzkiego. Głównym problemem jest występowanie napięć krokowych i dotykowych podczas odprowadzania prądu władowania piorunowego do ziemi w budynkach z poprawnie zaprojektowanymi i wykonanymi urządzeniami piorunochronnymi.

Mając na uwadze zarówno nieścisłości norm, jak i obecny stan wiedzy w zakresie bezpieczeństwa podczas wyładowań piorunowych, konieczne jest przeprowadzenie badań, obliczeń i pomiarów, których wyniki zapewnią poszerzenie wiedzy na ten temat. Uzyskane wyniki i opracowane na ich podstawie rozwiązania mogą w przyszłości ograniczyć liczbę śmiertelnych porażeń. Miejscami szczególnie zagrożonymi są wejścia do budynków, w których często gromadzą się ludzie, na przykład kina, teatry, centra handlowe. Spośród wielu konstrukcji budowlanych na szczególną uwagę zasługują obiekty powszechnie dostępne dla ludzi, takie jak wolnostojące wysokie konstrukcje, wieże, promenady, modne obecnie ogrody na dachach i tarasach, różnego rodzaju obiekty budowlane, w tym obiekty przemysłowe itp.

3. BEZPIECZEŃSTWO LUDZI PODCZAS WYŁADOWAŃ PIORUNOWYCH

Ocena bezpieczeństwa ludzi wymaga znajomości rozkładu napięć krokowych i dotykowych na terenie analizowanego obiektu oraz wartości maksymalnych napięć rażeniowych i obszaru ich występowania. Nie we wszystkich przypadkach napięcie dotykowe lub krokowe jest jednak adekwatną miarą poziomu bezpieczeństwa, gdyż nie zawsze może być ono jednoznacznie wyznaczone, choćby nawet ze względu na ograniczenia wynikające z samej natury analizowanej sytuacji (np. człowiek pływający w wodzie).

W niniejszym rozdziale zaproponowano modele matematyczne służące do określenia poziomu zagrożenia piorunowego ludzi przebywających w następujących miejscach:

- w pobliżu wolnostojących masztów i wież,
- pod liniami przesyłowymi wysokiego napięcia (w sąsiedztwie słupów wsporczych),
- pod drzewami,
- w wodzie,
- na terenie stacji bazowych GSM i ich najbliższym sąsiedztwie,
- na terenie stacji elektroenergetycznych WN,
- w pobliżu obiektów budowlanych posiadających urządzenia piorunochronne.

3.1. Charakterystyka zastosowanej metody obliczeniowej

Metody obliczeniowe, które znajdują zastosowanie w analizie impulsowych narażeń elektromagnetycznych występujących w rozległych obiektach, są oparte na metodach obwodowych i polowych.

W metodach obwodowych, które umożliwiają prowadzenie obliczeń w dziedzinie czasu lub częstotliwości, można szybko i w sposób bezpośredni wyznaczać charakterystyki częstotliwościowe i opisywać zjawiska nieliniowe. Szczególnie trudne jest uwzględnienie sprzężeń pomiędzy nadziemnymi i podziemnymi przewodzącymi elementami konstrukcyjnymi oraz zależności parametrów układu od częstotliwości. Istotnym problemem jest również wyznaczenie parametrów zastępczych elementów składowych modeli adekwatnych do rozważanego przypadku. W wielu okolicznościach metoda ta jest niemożliwa jednak do stosowania.

W metodach bazujących na teorii pola wszystkie efekty zjawisk wysokoczęstotliwościowych są uwzględniane w bezpośredni sposób. Obliczenia mogą być prowadzone albo w dziedzinie czasu, albo w dziedzinie częstotliwości. Analizy czasowe nie pozwalają na łatwe prognozowanie zachowania się układu w przypadku zastosowania innego niż pierwotnie zadane wymuszenie, natomiast analizy częstotliwościowe uniemożliwiają bezpośrednie modelowanie zjawisk nieliniowych.

Obecnie coraz bardziej popularne są metody oparte na przekształceniu równań Maxwella do postaci jednowymiarowego równania różniczkowo-całkowego. Układ wielu takich równań stanowi model matematyczny analizowanego obiektu. Do rozwiązania tego problemu wykorzystuje się tzw. metodę momentów (ang. MOM – *Method of Moments*). Różnorodność spotykanych odmian tej metody polega na odmiennym sposobie formułowania równań całkowych i dwojakim sposobie opisu rozkładu źródeł – w dziedzinie czasu lub w dziedzinie częstotliwości.

Stosując metodę momentów, należy przyjąć następujące założenia:

- sieć elementów przewodzących, tworząca analizowany obiekt lub urządzenie piorunochronne, składa się z prostoliniowych przewodników (zwanych segmentami) o znanej stratności;
- elementy nieprostoliniowe zastępuje się układem kilku prostoliniowych, wzajemnie połączonych przewodników;
- długości przewodników są wielokrotnie mniejsze od długości fali, co wymaga podziału poszczególnych przewodników na krótsze odcinki (z kolei przekłada się na wydłużanie procesu obliczeniowego);
- stosunek długości przewodnika do jego średnicy musi być dużo większy od jedności;
- poszczególne przewodniki znajdują się w układzie odniesienia 0xyz (mają określone współrzędne początków i końców);
- tworzony jest zbiór przewodników stanowiących źródło wymuszeń;
- tworzony jest zbiór przewodników z założonymi poziomami napięć i prądów w układzie (może być zbiorem pustym);
- tworzony jest zbiór przewodników stanowiących obciążenie sieci (elementy o parametrach skupionych).

Do wyznaczenia rozpływu prądów w sieci potrzebne są po dwa równania na każdy segment (przewodnik). W odniesieniu do węzłów sieci oznacza to, że dla każdego węzła, do którego dołączonych jest *n* segmentów, wymagane jest *n* równań.

W wyniku rozwiązania stworzonego według powyższych wytycznych układu równań otrzymuje się rozpływ prądów w modelowanym obiekcie. Na podstawie rozpływu prądów w modelowanym obiekcie można obliczyć:

- potencjały dowolnych punktów systemu uziomowego oraz połączonych z nimi konstrukcji nadziemnych,
- rozkłady natężeń pól elektromagnetycznych w obszarze analizowanych obiektów,
- prądy i napięcia w różnego rodzaju konstrukcjach i obwodach,
- prądy i napięcia indukowane przez prądy płynące w pobliskich obwodach i elementach systemu uziomowego.

Najbardziej ukierunkowany na obliczanie zagrożeń piorunowych metodą momentów jest pakiet programów opracowanych przez F. Dawalibi o akronimie CDEGS (ang. *Current Distribution, Electromagnetic Fields, Grounding and Soil Structure Analysis*) [98]. Składa się on z kilku odrębnych modułów obliczeniowych podzielonych pod kątem możliwych zastosowań. W skład pakietu wchodzą między innymi programy o akronimach: HIFREQ (ang. *Electromagnetic Fields Analysis*), FFTSES (ang. *Automated Fast Fourier Transform Analysis*), RESAP (ang. *Soil Resistivity Analysis*).

Najbardziej elastycznym i stwarzającym największe możliwości modelowania różnorodnych zjawisk elektromagnetycznych jest program HIFREQ. Umożliwia on równoczesne uwzględnienie wpływu elementów nadziemnych i tych ułożonych pod ziemią oraz modelowanie: zjawisk związanych z wyładowaniami piorunowymi w konstrukcjach przewodzących, stanów nieustalonych powstających podczas wyładowań piorunowych i procesów łączeniowych, oddziaływań wyższych harmonicznych pól elektromagnetycznych itp. HIFREQ jest bardzo przydatnym narzędziem, umożliwiającym stosunkowo łatwe definiowanie i rozwiązywanie tworzonych równań opisujących obiekt.

3.2. Model matematyczny

W dalszej części monografii analiza zagrożenia piorunowego będzie prowadzona metodą momentów, przy wykorzystaniu pakietu CDEGS. Opracowano trójwymiarowe modele analizowanych obiektów, opisując je szczegółowo w języku wewnętrznym programu HIFREQ. W tworzonych modelach uwzględniono sprzężenia galwaniczne, pojemnościowe i indukcyjne pomiędzy elementami, znajdującymi się zarówno na powierzchni ziemi, jak i pod ziemią. W analizowanych modelach występowały:

- stalowe konstrukcje nośne,
- zbrojenie fundamentów konstrukcji nośnych,

- uziomy kratowe i otokowe układane w ziemi na różnej głębokości,
- metalowe elementy wsporcze i nośne,
- zwody pionowe oraz przewody odprowadzające i uziemiające urządzenia piorunochronnego,
- elementy systemu wyrównywania potencjałów,
- rury systemu wodno-kanalizacyjnego,
- konary oraz różnorodne systemy korzeniowe drzew itp.

Przedmiotem rozważań nie jest szczegółowe modelowanie procesu rozwoju wyładowania piorunowego. Pozwoliło to przyjąć założenie upraszczające, polegające na pominięciu sprzężenia pomiędzy kanałem wyładowania a elementami analizowanych obiektów – ze względu na bliskość elementów z rozpływającym się prądem piorunowym w porównaniu z odległościami pomiędzy tymi obwodami a przyjętym do obliczeń kanałem w postaci zwodu pionowego o wysokości 22 m [16]. Przeprowadzona analiza porównawcza wykazała [16], że ewentualna zmiana długości przyjętego kanału wyładowania piorunowego wpływa jedynie w ograniczonym stopniu na rozpływ prądów i rozkład napięć w analizowanym modelu. W najbardziej niekorzystnych przypadkach różnica wynosiła poniżej 10% przy zmianie długości kanału od 22 m do 1 km. W obliczeniach pominięto również zjawiska wielkoprądowe, które mogą wystąpić w gruncie podczas przepływu prądu piorunowego w miejscu jego wprowadzenia do uziomu analizowanego obiektu.

W programie HIFREQ, stanowiącym część pakietu CDEGS, istnieje możliwość zastosowania zewnętrznego źródła prądu o nazwie LEAD. W odróżnieniu od typowego źródła prądu, stosując źródło LEAD, nie jest konieczne tworzenie drogi powrotnej dla rozpływającego się prądu udarowego. Taka właściwość źródła prądu umożliwia modelowanie zjawisk zachodzących podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w analizowane obiekty.

Ocena poziomu bezpieczeństwa wymaga wyznaczenia rozpływu prądów udarowych w systemie elementów przewodzących (modelu analizowanego obiektu) oraz rozkładu napięć względem ziemi odniesienia w analizowanych sytuacjach, co w dalszej kolejności pozwoli na obliczenie stosownych napięć krokowych i dotykowych.

Istotne z punktu widzenia dalszych analiz metalowe elementy zastąpiono w tworzonych modelach wybranymi przewodami o zdefiniowanym zastępczym przekroju kołowym, rezystywności, przenikalności magnetycznej. Pominięto przy tym elementy stanowiące dla prądu elektrycznego przerwę. Podczas tworzenia modelu matematycznego pominięto faktyczny stan połączeń elementów tworzących system uziomowy. Należy bowiem uwzględnić, że w praktyce nie jest możliwe stwierdzenie rzeczywistego stanu układu we wszystkich punktach. W wyniku procesu modelowania powstała siatka krzywych, rozmieszczonych w przestrzeni – zgodnie z przyjętym projektem obiektu. Elementy składowe przyjętych modeli obiektów mają postać sieci galwanicznie połączonych z sobą cylindrycznych przewodów, których średnice są zwykle dużo mniejsze od ich długości. Dodatkowo wymiary poprzeczne takich konstrukcji można traktować jako dużo mniejsze od najkrótszej długości fali odpowiadającej widmu impulsu elektromagnetycznego wyładowania piorunowego. Właściwości te wykorzystuje się do opisu zjawisk elektromagnetycznych zachodzących podczas wyładowań piorunowych w strukturach, które można uważać za cienkoprzewodowe [9] [90].

Do opisu pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez prostoliniowy przewód z prądem przyjęto następujące założenia [9] [90]:

- przewód z prądem jest nieskończenie cienki;
- przewód jest usytuowany w całości w jednej warstwie ośrodka złożonego z wielu warstw ułożonych pionowo jedna na drugiej;
- właściwości elektryczne każdej z warstw ośrodka są niezależne od wartości pola elektromagnetycznego.

Koncepcja liniowego źródła prądu wykorzystana w programie HIFREQ jest idealizowaną reprezentacją matematyczną przewodu z prądem (rys. 3.1) [9]. Przy założeniu, że w punkcie *s* nieskończenie cienkiego przewodu ułożonego wzdłuż drogi wyznaczonej wektorem $\vec{r_s}(s)$ płynie prąd I(s), gęstość prądu w przewodzie może być wyrażona zależnością:

$$\vec{J}(\vec{r}) = \int I(s) \cdot \delta(\vec{r} - \vec{r_s}(s)) \cdot \vec{r_s}(s) \cdot ds, \qquad (3.1)$$

gdzie:

 $\vec{r_s(s)} = \frac{d}{ds}\vec{r_s}$ jest wektorem stycznym do krzywej $\vec{r_s}$ w punkcie *s* (całka z gęstości prądu \vec{J} po przekroju poprzecznym przewodu w punkcie $\vec{r} = \vec{r_s(s)}$ wynosi I(s)). Liniowe źródło prądu można traktować jako zbiór źródeł punktowych (funkcja delta δ) o wartościach I(s) usytuowanych w punktach $\vec{r} = \vec{r_s(s)}$ i zorientowanych w kierunku wektora $\vec{r_s(s)}$. Ten zbiór źródeł punktowych funkcjonuje jako zbiór elementarnych dipoli. Dana wielkość elektromagnetyczna w dowolnym punkcie przestrzeni jest opisana sumą składowych pochodzących od poszczególnych dipoli [9].

Podstawą do sformułowania równań dwupotencjałowych są gęstości prądów elementarnych dipoli określone równaniem (3.1) oraz równania Maxwella. W jednorodnym stratnym ośrodku, przy uwzględnieniu [9], że:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}, \vec{B} = \mu \cdot \vec{H},$$
(3.2)

można sformułować następujące równania:

$$\varepsilon \cdot \nabla \cdot \vec{E} = \rho,$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0,$$

$$\nabla \times \vec{E} = j\omega\mu \cdot \vec{H},$$

$$\nabla \times \vec{H} = \theta \cdot \vec{E} + \vec{J}_{ext},$$

(3.3)

gdzie:

 $\theta = \sigma + j\omega\varepsilon,$

- ε przenikalność elektryczna ośrodka,
- μ przenikalność magnetyczna ośrodka,
- σ konduktywność ośrodka,
- $\overrightarrow{J_{ext}}$ gęstość prądu źródła zewnętrznego określona równaniem (3.1).



Rysunek 3.1. Idealizowana reprezentacja matematyczna przewodu z prądem [90]

Po uproszczeniu równania Maxwella [90]:

$$\nabla^2 \vec{\Pi} = \gamma^2 \vec{\Pi} - \frac{1}{\theta} \vec{J}_{ext} , \qquad (3.4)$$

w którym wektorowy potencjał Hertza Π definiowany jest następująco:

$$\vec{\Pi} = \frac{j\omega}{\gamma^2} \vec{A} = \frac{1}{\mu\theta} \vec{A}, \qquad (3.5)$$

gdzie: $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$; $\vec{E} = -j\omega\vec{A} - \nabla\phi$; $\nabla \cdot \vec{A} = -\mu\theta\phi$; ϕ - potencjał skalarny; \vec{A} - potencjał wektorowy. Na podstawie wektorowego potencjału Hertza można wyznaczyć pozostałe wielkości elektromagnetyczne przy wykorzystaniu przekształceń matematycznych:

$$\phi = -\nabla \cdot \Pi,$$

$$\vec{E} = -\gamma^2 \vec{\Pi} + \nabla \Big(\nabla \cdot \vec{\Pi} \Big),$$

$$\vec{H} = \theta \cdot \nabla \times \vec{\Pi}.$$
(3.6)

Rozwiązanie równania (3.4) można przedstawić w postaci liniowej superpozycji składowych pochodzących od poszczególnych elementarnych dipoli elektrycznych:

$$\vec{\Pi} = \int \vec{\Pi}_s \cdot ds , \qquad (3.7)$$

przy czym składowa wektorowego potencjału Hertza $\overline{\Pi_s}$ pochodząca od elementarnego dipola zorientowanego w kierunku wektora $\vec{r_s}$ spełnia równanie:

$$\nabla^2 \overrightarrow{\Pi_s} = \gamma^2 \overrightarrow{\Pi_s} - \frac{I(s)}{\theta} \cdot \delta(\overrightarrow{r} - \overrightarrow{r_s}) \cdot \overrightarrow{r_s}, \qquad (3.8)$$

W przypadku ośrodka wielowarstwowego dla pojedynczego dipola ułożonego w płaszczyźnie x–z (rys. 3.17) składowa y-owa potencjału wektorowego znika (wyniki dla przypadku innej orientacji dipola otrzymywane są przez odpowiednie przekształcenia geometryczne).



Rysunek 3.2. Geometria ośrodka wielowarstwowego [90]

W takim przypadku warunki brzegowe na granicach poszczególnych warstw prowadzą do następujących relacji pomiędzy składowymi potencjału wektorowego [90] [9]:

$$\gamma_{k}^{2}\Pi_{x}^{k} = \gamma_{k+1}^{2}\Pi_{x}^{k+1},$$

$$\theta_{k}\Pi_{z}^{k} = \theta_{k+1}\Pi_{z}^{k+1},$$

$$\theta_{k}\frac{\partial}{\partial z}\Pi_{z}^{k} = \theta_{k+1}\frac{\partial}{\partial z}\Pi_{z}^{k+1},$$

$$\theta_{k}\frac{\partial}{\partial z}\Pi_{z}^{k} = \theta_{k+1}\frac{\partial}{\partial z}\Pi_{z}^{k+1},$$

$$(3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\Pi_{x}^{k} + \frac{\partial}{\partial z}\Pi_{z}^{k} = \frac{\partial}{\partial x}\Pi_{x}^{k+1} + \frac{\partial}{\partial z}\Pi_{z}^{k+1},$$

gdzie k – numer warstwy.

Zakłada się, że potencjał wektorowy musi mieć skończoną wartość dla współrzędnych z $\rightarrow \pm \infty$.

Przy założeniu, że funkcja delta δ w równaniu 3.8 zostanie wyrażona przez funkcje Bessela w postaci:

$$\delta(\vec{r}) = \int_{0}^{\infty} \lambda \cdot J_{0}(\lambda r) \cdot \delta(z) \frac{d\lambda}{2\pi}, \qquad (3.10)$$

otrzymuje się składowe potencjału wektorowego w następującej postaci [90]:

$$\Pi_{x}^{k} = \int_{0}^{\infty} \left[\eta_{k}\left(\lambda\right) \cdot e^{-\alpha_{k}|z|} + F_{k}\left(\lambda\right) \cdot e^{-\alpha_{k}z} + G_{k}\left(\lambda\right) \cdot e^{\alpha_{k}z} \right] \cdot J_{0}\left(\lambda r\right) \cdot d\lambda,$$

$$\Pi_{z}^{k} = \int_{0}^{\infty} \left[\tau_{k}\left(\lambda\right) \cdot e^{-\lambda_{k}|z|} + H_{k}\left(\lambda\right) \cdot e^{-\alpha_{k}z} + T_{k}\left(\lambda\right) \cdot e^{\alpha_{k}z} \right] \cdot J_{0}\left(\lambda r\right) \cdot d\lambda, \qquad (3.11)$$

$$+ \cos \varphi \cdot \int_{0}^{\infty} \left[P_{k}\left(\lambda\right) \cdot e^{-\alpha_{k}z} + Q_{k}\left(\lambda\right) \cdot e^{\alpha_{k}z} \right] \cdot J_{1}\left(\lambda r\right) \cdot d\lambda.$$

Rozwiązanie to spełnia równania (3.8) oraz (3.9) dla $\alpha = \sqrt{\lambda^2 + \gamma^2}$.

Zbiór równań niezbędnych do obliczenia rozpływu prądów w analizowanej strukturze otrzymywany jest na podstawie [9] [90]:

- warunków brzegowych na powierzchni przewodów, w których nieznane prądy zastępuje się ich reprezentacją parametryczną, natomiast potencjały skalarny i wektorowy otrzymywane są na podstawie równań warunków brzegowych na granicy warstw ośrodka (równania 3.11 oraz 3.6);
- zachowania praw Kirchhoffa w węzłach sieci;
- zachowania prądów wstrzykiwanych do układu z zewnątrz.

Stosując w praktyce powyższe rozważania, dla różnych analizowanych poniżej obiektów stworzono ich model matematyczny, który finalnie składał się z układu kilku tysięcy równań Maxwella. Do ich rozwiązania wykorzystano metodę momentów zaimplementowaną w programie HIFREQ. Finalnie każdy segment stanowiący element składowy modelu obiektu zapisano numerycznie za pomocą wewnętrznych równań programu HIFREQ [98], opisując jego lokalizację w przestrzeni za pomocą sześciu współrzędnych $x_1-y_1-z_1$ (początek) i $x_2-y_2-z_2$ (koniec) oraz uwzględniając jego przekrój i rodzaju materiału, z którego został wykonany. Opis uzupełniono o zbiór wymuszeń dobrany stosownie do analizowanego przypadku doziemnego wyładowania piorunowego.

Na podstawie rozwiązań równań Maxwella otrzymano rozpływ prądów w przewodzących elementach modelu analizowanej konstrukcji, co pozwoliło w dalszej kolejności obliczyć potencjały dowolnych punktów systemu uziomowego oraz połączonych z nimi konstrukcji nadziemnych.

3.3. Bezpieczeństwo ludzi w pobliżu wolnostojącego masztu

W poniższym podrozdziale przeanalizowano zagrożenie piorunowe w pobliżu wolnostojących wysokich obiektów występujących w aglomeracjach miejskich, takich jak wieże stalowe i maszty flagowe. W bezpośrednim sąsiedztwie takich obiektów może przebywać zazwyczaj wiele osób jednocześnie, szczególnie w sezonie letnim. Bardzo często maszty oraz inne obiekty budowlane otoczone są chodnikami lub innymi utwardzonymi powierzchniami, na których przebywają ludzie. W Polsce chodniki wykonuje się najczęściej z asfaltu, kostki brukowej, kostki kamiennej. Materiały te cechuje bardzo duża rezystywność w porównaniu z rezystywnością gruntu. Należy również zauważyć, że chodniki są podczas burzy najczęściej mokre, a woda ma małą rezystywność w porównaniu z rezystywnością gruntu. W wielu sytuacjach chodnik nie jest też powierzchnią izolowaną. Zdarzają się bowiem pęknięcia struktury asfaltu i piaskowe przerwy między kostkami bruku, w które może wpłynąć woda deszczowa. W takiej sytuacji należy się zastanowić nad problemem porażenia ludzi podczas bezpośrednich wyładowań piorunowych w takie obiekty.

W pobliżu chodników umieszczane są zazwyczaj dodatkowe elementy wyposażenia, takie jak barierki, ławki oraz inne niewidoczne na pierwszy rzut oka zakopane elementy metalowe, rury, kable itp. Chodniki bardzo często otoczone są drzewami. Analiza bezpieczeństwa zostanie przeprowadzona jednak z pominięciem drzew, gdyż będą one analizowane szczegółowo w dalszej części tekstu.

W pierwszej kolejności przeanalizowano zagrożenie związane z wysokimi masztami flagowymi, które stanowią najwyższy punkt narażony na bezpośrednie wyładowania piorunowe. Na rysunku 3.3 przedstawiono rozmieszczenie różnorodnych elementów w sąsiedztwie masztu flagowego. Do obliczeń przyjęto, że chodnik składa się z trzech odrębnych warstw. Pierwsza, o grubości 1 mm, reprezentuje cienką warstwę wody deszczowej o rezystywności 0,032 Ω ·m. Druga, o grubości 100 mm, kostkę brukową o rezystywności 5000 Ω ·m. Trzecia warstwa, o nieskończonej z założenia grubości, grunt o rezystywności 100 Ω ·m.

W maszt flagowy o wysokości 15 metrów wprowadzono prąd piorunowy o wartości szczytowej 200 kA i kształcie 10/350 µs (I poziom ochrony). W przyjętym modelu założono, że maszt jest wykonany z rur stalowych o średnicy 15 cm, dodatkowo wzmocnionych w pięciu miejscach poprzecznymi rurami stalowymi o średnicy 5 cm. System uziomowy masztu składa się z trzech uziomów pionowych o długości 3 m każdy, które połączono przy nasadzie stalowymi rurami o średnicy 5 cm [32][44][59]. Przyjęto również, że maszt został wykonany z rur stalowych o średnicy 15 cm. Konstrukcja została wzmocniona w pięciu miejscach poprzecznymi elementami wsporczymi, wykonanymi z rur stalowych o średnicy 5 cm. W odległości pięciu metrów od środka masztu umieszczono cztery elementy, takie jak: metalowa ławka o wymiarach 1,5x0,7 m, metalowa barierka o wymiarach 1x1 m, element metalowy (samodzielny otok) o wymiarach 1x1 m, umieszczony na głębokości 0,6 m, oraz metalowy pręt o długości 1 m, umieszczony również na głębokości 0,6 m. Obliczenia wykonano metodą momentów z wykorzystaniem programu HIFREQ wchodzącego w skład pakietu CDEGS [98].



Rysunek 3.3. Graficzna reprezentacja modelu wielowarstwowego chodnika z elementami dodatkowymi (ławka, metalowa barierka, metalowy pręt, metalowy element zakopany w ziemi)

Uwzględniając przyjętą w rozdziale drugim definicję napięć krokowych, wyznaczono rozkład tych napięć na poziomie ziemi – przy założeniu, że rezystancja ciała człowieka wynosi 1000 Ω . W obliczeniach pominięto impedancję obuwia człowieka (rys. 3.4). Analizowano najgorszy przypadek, w którym to osoba rażona nie dotyka żadnych innych elementów metalowych. Oznacza to, że prąd rażeniowy przepływa na drodze prawa stopa – lewa stopa. Na rysunku 3.5 przedstawiono obliczone przebiegi napięć krokowych w trzech wybranych punktach: 1 – narożnik masztu, 2 i 3 – w odległości odpowiednio 5 i 10 metrów od narożnika masztu. Przebieg napięcia dotykowego przedstawiono tylko dla punktu 1, ze względu na ograniczony obszar jego występowania (rys. 3.6). Początkowe oscylacje widoczne na przebiegu są spowodowane odbiciami fali napięciowej od elementów składowych masztu flagowego.



Rysunek 3.4. Obwód obliczeniowy reprezentujący ciało ludzkie: V_{KR} – napięcie krokowe, Z_{ST} – impedancja stóp człowieka, R_C – rezystancja ciała człowieka



Rysunek 3.5. Przebiegi napięcia krokowego w pobliżu wolnostojącego masztu w trzech wybranych punktach: 1 – narożnik masztu, 2 i 3 – w odległości odpowiednio 5 i 10 metrów od narożnika masztu



Rysunek 3.6. Przebiegi napięcia dotykowego w pobliżu wolnostojącego masztu w punkcie 1 (narożnik masztu)

W celu poszerzenia obrazu zagrożenia występującego w pobliżu masztu flagowego podczas wyładowania piorunowego wyznaczono również rozkłady napięć rażeniowych dla jednej wybranej chwili t=10 µs, po której zanikają początkowe wysokoczęstotliwościowe oscylacje, a napięcia są największe. Dodatkowo należy zauważyć, że napięcie krokowe i dotykowe – z racji przyjętego modelu ciała człowieka – ma przebieg czasowy zbliżony do kształtu prądu pierwszego wyładowania głównego, stąd też chwila t=10 µs wydaje się najbardziej adekwatna do prezentacji rozkładu napięć rażeniowych. Na rysunku 3.7 przedstawiono rozkład napięć krokowych na powierzchni mokrego chodnika. Maksymalne napięcie krokowe w pobliżu masztu flagowego wynosi 30 kV, a w odległości 20 m od masztu już tylko 3 kV, czyli jest dziesięciokrotnie mniejsze. Rozkład napięcia dotykowego w odległości 1 m od masztu przedstawia rysunek 3.8. Maksymalna wartość napięcia dotykowego może sięgać 650 kV.

Na rysunku 3.9 przedstawiono rozkład napięć krokowych w pobliżu metalowej ławki. Z obliczeń wynika, że ławka zmienia wartości napięcia krokowego w swoim obrębie. Napięcia krokowe na przedniej i tylniej części ziemi pod ławką charakteryzują się innymi wartościami, co świadczy o przepływie prądu wyrównawczego.

Zauważono, że metalowa poręcz powoduje ekwipotencjalizację najbliższego sobie obszaru, co zmniejsza lokalną wartość napięć krokowych. Zaobserwowano, że każdy dodatkowy element metalowy znajdujący się w ziemi odkształca rozkład napięć krokowych, powodując lokalne ekstremum.



Rysunek 3.7. Rozkład napięć krokowych w sąsiedztwie masztu flagowego dla t=10µs



Rysunek 3.8. Rozkład napięć dotykowych w odległości 1 m od masztu flagowego dla t=10µs



Rysunek 3.9. Rozkład napięć krokowych w sąsiedztwie ławki dla t=10µs

Wyniki obliczeń wskazują, że w promieniu 5 m od masztu przekroczony został dopuszczalny poziom napięcia krokowego wg Neuhausa (15 kV). Poziom napięcia krokowego 25 kV, dopuszczalny wg [79], został przekroczony w promieniu 4 metrów. Każdorazowe dotknięcie ręką jakiegokolwiek elementu metalowego jest niebezpieczne dla życia ludzi, gdyż wartości napięć dotykowych zdecydowanie przewyższają dopuszczalne poziomy wg [79]. Pozostałe elementy umieszczone w pobliżu analizowanego masztu nie wpływają na rozkład napięć krokowych. Lo-kalnie ulega tylko zmianie rozkład napięć, nie wpływając jednak w żaden sposób na poziom bezpieczeństwa. W odległości 50 m od wysokich wież, masztów flagowych napięcia krokowe spadają poniżej 250 V.

Z uzyskanych wyników obliczeń nasuwa się jeden istotny wniosek, iż należy unikać przebywania w sąsiedztwie wysokich elementów architektonicznych – masztów, wież itp. Wskazane jest jak najszybsze przejście do budynku lub samochodu. Jeśli to nie jest możliwe, nie należy dotykać żadnych metalowych elementów. Wskazane jest usiąść na ławce w takiej pozycji, aby nie dotykać nogami ziemi. Wówczas, w przypadku wyładowania piorunowego, człowiek znajdzie się na wysokim potencjale. Spowoduje to, że nie zostanie narażony na niebezpieczne wartości napięć krokowych. W analizowanym przypadku metalowa ławka pełni rolę elementu ochrony przed napięciami rażeniowymi.

Zaleca się więc, aby nowo projektowane promenady były wyposażone w jak największą liczbę metalowych ławek, które mogłyby być elementami ochrony przed napięciami rażeniowymi podczas burzy.
3.4. Skutki oddziaływania prądów piorunowych na wolnostojące maszty

Rozpatrując problem bezpieczeństwa ludzi na terenie parków i deptaków, należy również przeprowadzić analizę skutków oddziaływania prądów piorunowych na wysokie metalowe konstrukcje, na przykład latarnie, maszty aluminiowe i tym podobne elementy stawiane na terenie rekreacyjnym lub w bliskim jego sąsiedztwie. W tym celu wykonano badania laboratoryjne skutków przepływu prądów udarowych w elementach połączeń masztów, które według normy [84] mogą stanowić element urządzenia piorunochronnego, jeśli ich przekrój przekracza 50 mm². Przeprowadzone badania nie miały na celu analizy odporności masztu na skutki przepływu prądu piorunowego, lecz oszacowanie poziomu zagrożenia ludzi stwarzanego przez rozpływający się prąd udarowy o dużej wartości szczytowej. Do badań wybrano maszt wysuwany jako przypuszczalnie najmniej odporny na działanie prądu udarowego.

Przepływowi prądu piorunowego przez urządzenie piorunochronne, elementy konstrukcyjne obiektu lub inne instalacje przewodzące mogą towarzyszyć następujące zjawiska:

- erozja termiczna metalu w miejscu kontaktu z kanałem piorunowym,
- rozżarzenie elementów metalowych wzdłuż drogi przepływu prądu,
- elektrodynamiczna deformacja torów prądowych,
- uszkodzenia mechaniczne spowodowane wstrząsową falą akustyczną,
- iskrzenie na stykach elementów przewodzących.

W zależności od charakteru obiektu i zastosowanego urządzenia piorunochronnego dominujące są zwykle tylko niektóre z wymienionych powyżej zjawisk. W przypadku masztów oddziaływania elektrodynamiczne, akustyczne oraz iskrzenie praktycznie nie stanowią zagrożenia. Dlatego też skupiono się na analizie skutków termicznych oddziaływania prądu udarowego na elementy połączeń masztów, które w najbardziej niekorzystnych warunkach mogą zwiększać poziomy napięć dotykowych poprzez rezystancyjne spadki napięć.

Badania laboratoryjne skutków przepływu prądów udarowych w elementach połączeń masztów przeprowadzono, wykorzystując generator, który wytwarzał prądy udarowe o zmiennych wartościach czasu czoła (T_1), czasu do półszczytu (T_2) oraz wartości maksymalnej prądu udarowego (I_m) – rys. 3.10.

Próby laboratoryjne przeprowadzono dla prądów udarowych odbiegających od normatywnych [83], niemniej jednak dzięki badaniom możliwe staje się przybliżone określenie charakteru zjawisk występujących podczas przepływu prądu piorunowego.

Zdjęcia elementów po próbach udarowych przedstawiono na rysunkach 3.11-3.17.



Rysunek 3.10. Generator udarów prądowych: a) schemat elektryczny; b) kształt udaru prądowego; c) stanowisko badawcze; d) przykładowy przebieg prądu na wyjściu generatora ($20/40 \text{ } \mu \text{s}, I = 34 \text{ } \text{kA}$)

Parametry generatora:

$$C = 3 \times C_1 = 3 \times 28 \ \mu F = 84,8 \ \mu F,$$

 $R_b = 0.92 \text{ m}\Omega$,

 $R_1 - rezystancje taśm miedzianych łączących poszczególne elementy generatora, L, <math display="inline">R_2 - zmienne wartości dobierane stosownie do żądanego kształtu udaru prądowego, <math display="inline">R_o - badany \ obiekt$



Rysunek 3.11. Skutki przepływu prądu udarowego w elementach połączeń masztów; próba nr 1 $(I_{max} = 1 \text{ kA}, \text{ udar } 8/20 \text{ }\mu\text{s})$



Rysunek 3.12. Skutki przepływu prądu udarowego w elementach połączeń masztów; próba nr 2 $(I_{max} = 5 \text{ kA}, \text{ udar } 8/75 \text{ } \mu\text{s})$





Rysunek 3.13. Skutki przepływu prądu udarowego w elementach połączeń masztów; próba nr 3 $(I_{max} = 20 \text{ kA}, \text{ udar oscylacyjny})$



Rysunek 3.14. Skutki przepływu prądu udarowego w elementach połączeń masztów; próba nr 4 $(I_{max} = 26 \text{ kA}, \text{ udar oscylacyjny})$



Rysunek 3.15. Skutki przepływu prądu udarowego w elementach połączeń masztów; próba nr 5 $(I_{max} = 40 \text{ kA}, \text{ udar oscylacyjny})$



Rysunek 3.16. Skutki przepływu prądu udarowego w elementach połączeń masztów; próba nr 5 $(I_{\text{max}} = 40 \text{ kA}, \text{udar oscylacyjny})$



Rysunek 3.17. Skutki przepływu prądu udarowego w elementach połączeń masztów; próba nr 6 $(I_{\text{max}} = 55 \text{ kA}, \text{udar oscylacyjny})$

Podsumowując rezultaty badań, można stwierdzić, że konstrukcja masztu, przez którą przepływa prąd udarowy, może pośrednio wpłynąć na poziom bezpieczeństwa osób postronnych znajdujących się w jego najbliższym otoczeniu. W wyniku przepływu prądu udarowego przez maszt flagowy następuje erozja termiczna metalu, z którego został on wykonany (rys. 3.11–3.15). Zaobserwowano znaczne iskrzenie na stykach poszczególnych sekcji masztu flagowego (rys. 3.16 i 3.17). W wyniku przepływu prądu udarowego występuje również rozżarzenie elementów metalowych na styku kolejnych sekcji masztu oraz wydmuchiwanie palących się kropli metalu na zewnątrz konstrukcji.

Iskrzenie oraz rozżarzenie podczas przepływu prądu udarowego może spotęgować odczucie strachu w osobach postronnych przebywających w bliskiej odległości od masztu. Smar konserwujący złącza poszczególnych sekcji masztu flagowego ulega rozkładowi podczas przepływu prądu udarowego na frakcje lotne, odczuwalne organoleptycznie w bliskim sąsiedztwie. Przy rzeczywistych wartościach prądu piorunowego może dojść do zapłonu smaru konserwującego. Wewnętrzne połączenia mechaniczne poszczególnych sekcji mają charakter "wysokoomowy", powodując znaczący wzrost napięcia dotykowego podczas przepływu prądu udarowego. Wartość tych napięć może być wielokrotnie większa niż napięcia dotykowe występujące na konstrukcji uziomowej masztu.

3.5. Bezpieczeństwo ludzi przebywających pod drzewami

Bezpośrednie wyładowanie piorunowe w drzewo może być niebezpieczne dla osób stojących w jego bliskim sąsiedztwie. Przepływ prądu piorunowego poprzez pień, gałęzie i konary do ziemi stwarza niebezpieczeństwo wystąpienia:

- napięć dotykowych i krokowych,
- przeskoków iskrowych od pnia i gałęzi do ludzi stojących pod drzewem.

W latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku w publikacjach krajowych pojawiło się wiele prostych zaleceń, których stosowanie miało zmniejszyć zagrożenie podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego w człowieka znajdującego się pod drzewem (rys. 3.18) [14]. Bezpieczna pozycja w pobliżu drzewa, sugerowana w literaturze, przedstawiona jest na rysunku 3.19 [14] – w przestrzeni chronionej tworzonej przez drzewa. Zaleca się, aby podczas deszczu zachować stosowne odległości od pnia i gałęzi. W celu ochrony zalecano stosować przewód miedziany lub stalowy o przekroju 6 lub 10 mm², umieszczony w sposób pokazany na rysunku 3.20 [14]. Stosowanie tej metody jest nierealne w praktyce, dlatego też w dalszej części rozdziału szczegółowo przeanalizowano zagrożenie w pobliżu drzewa. Należy również zauważyć, że propozycje dotyczące bezpiecznej odległości od drzewa – podane przez prof. Szpora – mogą być inne, gdy uwzględni się obecnie zalecaną zasadę toczonej kuli.



Rysunek 3.18. Ilustracja zagrożenia piorunowego człowieka pod drzewem przez wyładowanie piorunowe: 1 – rozpływający się prąd wyładowania piorunowego, 2 – człowiek dotykający pnia drzewa (sytuacja bardzo niebezpieczna), 3 – człowiek w bezpieczniejszej odległości [14]



Rysunek 3.19. Bezpieczna sytuacja w pobliżu [14]: a) pojedynczego drzewa, b) między dwoma drzewami; linia przerywana – granica strefy osłonowej



Rysunek 3.20. Przewód ochrony odgromowej zamocowany na pniu drzewa [14]: 1,2 – pętle dokoła pnia, 3,4 – część przewodu pod stopami chronionego człowieka, 5 – pętla na gałęzi nad głową człowieka

Rozkład potencjałów w pobliżu drzewa, a co za tym idzie, rozkład wartości napięć krokowych na powierzchni ziemi podczas przepływu prądu piorunowego poprzez strukturę pnia drzewa i system korzeniowy do ziemi, może być istotnym zagrożeniem. W literaturze światowej dostępne są liczne opisy przypadków porażeń oraz zdjęcia uszkodzonych drzew itp. [17][27][29][35][40][48][54][68]. Obecnie nie publikuje się wyników szczegółowych analiz teoretycznych oraz pomiarów napięć krokowych wywołanych przez prądy udarowe wpływające do systemu korzeniowego.

Rozpatrując zagrożenie piorunowe w pobliżu drzewa, należy pamiętać (rys. 1.2), że człowiek znajdujący się bezpośrednio przy pniu narażony jest na skutki przeskoków lub przepływu prądu odgałęzienia głównego kanału wyładowania doziemnego. Stąd też oczywiste jest, że w przypadku bezpośredniego wyładowania piorunowego w drzewo dotknięcie pnia spowoduje zawsze porażenie. Mając powyższe na uwadze, jako miarę poziomu bezpieczeństwa przyjęto wartość napięcia krokowego.

Poziom napięć krokowych jest bezpośrednio powiązany z rodzajem systemu korzeniowego drzewa. Każdy gatunek drzewa ma unikatowy system korzeniowy. Większość gatunków drzew nie penetruje gruntu zbyt głęboko. Zazwyczaj korzenie sięgają na głębokość 15...45 cm, gdzie składniki odżywcze występują najobficiej. System korzeniowy zajmuje powierzchnię około 2–3-krotnie większą niż obszar zajmowany przez koronę drzewa. Niemniej jednak na terenach suchych proporcja wagi między częścią podziemną i nadziemną drzewa mieści się w granicach od 1/5 do 4/5, co powoduje, że konary są cięższe około 4–5-krotnie od korzeni drzewa. Można z tego wywnioskować, że drzewa na terenach suchych mają słaby system korzeniowy. Również na układ systemu korzeniowego wpływają warunki naturalne, takie jak twardy grunt, poziom wód gruntowych, konsystencja gruntu, struktura gruntu, poziom kompresji gruntu w miejscu, w którym rośnie drzewo. Przekłada się to na wartości napięć krokowych (rys. 3.21).



Rysunek 3.21. Ilustracja zagrożenia piorunowego w pobliżu drzewa

Rozróżnia się trzy podstawowe rodzaje systemów korzeniowych drzew (rys. 3.22) [96]:

- palowy (np. orzech włoski, hikora, amerykański orzech oleisty, dąb biały, grab),
- sercowaty (np. dąb czerwony, grochodrzew, lipa, jawor, sosna),
- poziomy (np. brzoza, jodła, świerk, klon, topola amerykańska, klon srebrzysty).



Rysunek 3.22. Różne rodzaje systemów korzeniowych drzew [96]: a) palowy, b) sercowaty, c) poziomy

W stworzonym modelu matematycznym drzew uwzględniono części znajdujące się zarówno nad ziemią, jak i pod ziemią, tj. gałęzie, konary, korzenie, pień. Pominięto drobne elementy, takie jak liście. We wszystkich przypadkach przyjęto, że rezystywność gruntu jest równa 100 Ω ·m, rezystywność konarów, pnia i korzeni drzewa 1000 Ω ·m [15].

Modelując trzy podstawowe systemy korzeniowe drzew, przyjęto, że korzenie sięgają:

- 20 m w głąb ziemi (system palowy),
- 12,5 m w głąb ziemi i są rozłożone w promieniu 10 m od pnia (system sercowaty),
- maksymalnie 5 m w głąb i są rozłożone w promieniu 20 m od pnia drzewa (system poziomy).

Dodatkowo przyjęto, że każde drzewo ma 20 korzeni w części promieniście rozchodzącej się od głównego pnia. Wysokość każdego rodzaju modelu drzewa była jednakowa i wynosiła h=15 m. Rysunek 3.23 przedstawia graficzną reprezentację omawianych modeli drzew.



Rysunek 3.23. Graficzna reprezentacja modelu matematycznego drzewa o systemie korzeniowym: a) palowym, b) sercowym, c) poziomym

Wykorzystując metodę momentów, wykonano obliczenia dla prądów udarowych (o wartości szczytowej 100 kA i kształcie 10/350 µs) wpływających do czubka drzewa. Na kolejnych rysunkach 3.24–3.27 przedstawiono przebiegi napięć krokowych dla czterech wybranych punktów, oddalonych odpowiednio o 1, 2, 3, 4 metry od pnia drzewa (punkt środkowy ciała człowieka z rozstawem nóg równym 1 m). We wszystkich prezentowanych przypadkach zaobserwowano tłumione oscylacje, trwające około 500 ns. Zjawisko to zauważono również podczas rzeczywistych pomiarów napięć krokowych (rys. 4.7 i 4.8).



Rysunek 3.24. Przebiegi napięcia krokowego w 4 wybranych punktach oddalonych od pnia drzewa o odpowiednio 1,2,3,4 metry dla t \in <0;5> µs; system korzeniowy typu palowego



Rysunek 3.25. Przebiegi napięcia krokowego w 4 wybranych punktach oddalonych od pnia drzewa o odpowiednio 1,2,3,4 metry t \in <1;50> μ s; system korzeniowy typu palowego



Rysunek 3.26. Przebiegi napięcia krokowego w 4 wybranych punktach oddalonych od pnia drzewa o odpowiednio 1,2,3,4 metry t \in <1;50> μ s; system korzeniowy typu sercowatego



Rysunek 3.27. Przebiegi napięcia krokowego w 4 wybranych punktach oddalonych od pnia drzewa o odpowiednio 1,2,3,4 metry t \in <1;50> µs; system korzeniowy typu poziomego

Poniżej, na rysunkach 3.28–3.30, przedstawiono wyniki obliczeń, zaś w tabeli 3.1 zestawiono otrzymane wartości szczytowe napięć krokowych dla wybranych systemów korzeniowych.

Tabela 3.1. Największe wartości napięć krokowych dla różnych typów systemów korzeniowych drzew

System korzeniowy	Maksymalne napięcie krokowe [kV]	
palowy	294,95	
sercowaty	569,39	
poziomy	634,76	

Wyniki obliczeń napięć krokowych przedstawiono dla wybranej chwili czasowej t=10 µs, gdy zanikają oscylacje napięć krokowych i wartość chwilowa osiąga swoje maksimum.



Rysunek 3.28. Rozkład napięć krokowych w sąsiedztwie drzewa z systemem korzeniowym typu palowego dla $t = 10 \ \mu s$



Rysunek 3.29. Rozkład napięć krokowych w sąsiedztwie drzewa z systemem korzeniowym typu sercowatego dla $t = 10 \ \mu s$



Rysunek 3.30. Rozkład napięć krokowych w sąsiedztwie drzewa z systemem korzeniowym typu poziomego dla $t = 10 \ \mu s$

Zestawiając wyniki pomiarów z wytycznymi [79] dotyczącymi napięć krokowych, można uznać, że dopuszczalne poziomy napięć są (licząc od pnia drzewa) przekroczone w promieniu:

- 10 metrów w przypadku systemu korzeniowego typu palowego,
- 25 metrów w przypadku systemu korzeniowego typu poziomego,
- 15 metrów w przypadku systemu korzeniowego typu sercowatego.

Porównując otrzymane wyniki z kryteriami podanymi przez Neuhausa, poziomy napięć przekroczono w promieniu o 1...2 metry większym, co nie wpływa znacząco na całościowy obraz zagrożenia.

3.6. Bezpieczeństwo ludzi przebywających w wodzie

Do opinii publicznej docierają bardzo często informacje medialne o porażeniach prądem elektrycznym w wodzie na skutek wyładowania piorunowego. Poniżej opisano kilka przypadków porażeń ludzi z ostatnich kilku lat. Przykładowo w 2005 roku trzy osoby zostały śmiertelnie porażone podczas kąpieli w oceanie w pobliżu miejscowości Tampa na wschodnim wybrzeżu USA [99]. Kolejne cztery osoby zostały śmiertelnie porażone w wodach przybrzeżnych Japonii w prefekturze Chiba, zaś dwie osoby zostały poważnie ranne [99]. Pojawiają się również doniesienia prasowe o porażeniach podczas kąpieli w basenie. Na przykład w lipcu 2006 roku 50-letni mężczyzna, mocząc tylko nogi w basenie w wynajętej willi we Włoszech, został śmiertelnie porażony na skutek wyładowania piorunowego w taflę wody, a jego towarzysz został ciężko ranny [99]. Nawet prysznice i wanny stają się niebezpiecznymi miejscami podczas burzy na skutek zjawiska wynoszenia potencja-łów poprzez sieć wodociągową i kanalizacyjną.

Analizując dane rządu USA, zebrane w latach 1959–2005, widoczne jest, że zdarzenia niebezpieczne w wodzie stanowią 13% wszystkich porażeń powstałych w wyniku oddziaływania prądu piorunowego (spośród tych, w których przyczyny są udokumentowane). Niemniej jednak nie są one tak częste, jak trafienia bezpośrednie (28%) i porażenia w pobliżu drzew (17%). Floryda jest najbardziej niebezpiecznym stanem w USA, jeśli wziąć pod uwagę śmiertelne porażenia prądem w wodzie na skutek wyładowań piorunowych. Stanowią one 25% wszystkich zdarzeń [93][99].

Zagrożenie kąpiących się osób wzrasta wraz ze wzrostem rezystywności wody, czyli im jest ona gorszym przewodnikiem, tym zagrożenie jest większe. W literaturze przedmiotowej częściej operuje się pojęciem konduktywności, która jest odwrotnie proporcjonalna do rezystywności. Jest ona miarą zdolności danego materiału do przewodzenia prądu elektrycznego. Konduktywność wody silnie zależy od koncentracji rozpuszczonych w niej soli mineralnych i innych związków chemicznych. Bardzo często wartość konduktywności wykorzystywana jest do określenia stopnia zasolenia, zanieczyszczenia oraz zdemineralizowania wody [95]. Im woda jest czystsza, tym jej konduktywność jest mniejsza. Wartość konduktywności wody odnosi się na ogół do konduktywności czystej wody w temperaturze 25°C [95]. W tabeli 3.2 zamieszczono dane dotyczące rezystywności i konduktywności różnych rodzajów wody.

Rodzaj wody	Rezystywność [Ω·cm]	Konduktywność [µS/cm]
Czysty związek chemiczny H ₂ O	20000000	0,05
Woda destylowana	500000	2
Woda deszczowa	20000	50
Woda w kranie	1000–5000	200-1000
Woda w rzece	2500	400
Woda w rzece (lekko słona)	200	5000
Woda morska przybrzeżna	30	33000
Woda morska w otwartym morzu	20–25	40000-50000

Tabela 3.2. Rezystywność oraz konduktywność wody w temperaturze 25°C ([94][95])

Prawdopodobieństwo bezpośredniego trafienia przez piorun jest ściśle skorelowane z wysokością ciała nad poziomem wody, na przykład podczas brodzenia w wodzie i pływania. Jeśli nie wystąpi porażenie bezpośrednie, najbardziej istotna jest odległość od miejsca wyładowania piorunowego do miejsca przebywania zagrożonej osoby. Należy zauważyć, że prąd wyładowania piorunowego w wodzie rozpłynie się we wszystkich kierunkach od miejsca zetknięcia się kanału wyładowania z taflą wody. Z punktu widzenia bezpieczeństwa osób kąpiących się kluczowe jest więc zmniejszenie obszaru, w którym może dojść do porażenia. Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na obszar rażenia jest także rodzaj wody (słona lub słodka) [99].

W przypadku porażeń w wodzie trudno jest mówić o napięciach krokowych i dotykowych. Bardziej adekwatne staje się analizowanie rozkładu potencjału w wodzie podczas wyładowania piorunowego w zależności od jej rezystywności. W dalszych rozważaniach stosuje się pojęcie "napięcie rażeniowe", które należy rozumieć jako różnicę potencjałów między powierzchnią wody a miejscem, w którym może znajdować się serce pływaka (na podstawie przyjętej drogi rażenia).

Analizę bezpieczeństwa podczas wyładowania piorunowego w wodę przeprowadzono dla dwóch przypadków. W pierwszym założono, że pływak znajduje się w wodzie sam, a w drugim, że obok pływaka znajduje się specjalnie skonstruowana i uziemiona pływająca boja. Układ z pływającą uziemioną boją jest autorską propozycją, mającą na celu ograniczenie wpływu rozpływającego się prądu piorunowego na wartości natężenia pola elektrycznego w wodzie. Rozkład potencjału skalarnego w wodzie przyjęto jako miarę zagrożenia. Sama boja składa się z elementu pływającego i części wystającej z wody, dwóch metrów przewodu miedzianego pozbawionego izolacji o przekroju 16 mm² oraz stalowej kratownicy o wymiarach 1x1 metr przymocowanej na końcu przewodu (oczko 10 x 10 cm). Pływająca boja zabezpiecza przed bezpośrednim wyładowaniem piorunowym osoby znajdujące się w sąsiedztwie oraz stanowi element ochrony przed porażeniem (element ograniczający napięcia rażeniowe). Poniżej przedstawiono trójwymiarowy widok dwóch analizowanych przypadków.



a)

Rysunek 3.31. Analizowane przypadki bezpieczeństwa człowieka w wodzie: a) bez boi ochronnej, b) z uziemioną boją ochronną o wymiarach 1x1 m

Wszystkie obliczenia przeprowadzono dla najbardziej popularnego w Polsce rodzaju wody (woda w rzece o parametrach – 2500 Ω ·m lub 400 μ S/cm). Założono również, że:

- woda ma rezystywność niezależną od głębokości,
- prąd piorunowy o wartości szczytowej 100 kA (10/350 μs) wprowadza się w punkcie A (rys. 3.31),
- długość kanału wyładowania piorunowego wynosi 22 m,

 ciało człowieka zastąpiono dla potrzeb modelu matematycznego przewodnikiem o stałej rezystancji 1 kΩ i długości 1,8 m.

Obliczenia przeprowadzono z wykorzystaniem programu CDEGS [89]. Rozkład potencjału skalarnego wyznaczono dla 6 różnych trawersów (profili – linii, wzdłuż których przeprowadzono obliczenia). Liczbę trawersów ograniczono ze względu na wykładniczą zależność czasu prowadzonych obliczeń i liczbę niewiadomych w równaniach stanowiących model matematyczny.



Rysunek 3.32. Rozmieszczenie punktów, w których obliczano wartości potencjału skalarnego w wodzie (widok z góry)

Przyjęto stały odstęp między poszczególnymi trawersami, równy 20 m. Na rysunku 3.32 zamieszczono aranżację punktów wzdłuż trawersów 1–6, dla których wyznaczono wartości potencjału skalarnego. Obliczenia wykonano wzdłuż osi X–Y, na stałej głębokości równej 10 cm, co odpowiada średniej odległości między karkiem człowieka a poziomem serca. Jako linię graniczną między dwoma analizowanymi ośrodkami powietrze-woda (zanurzenia w wodzie) przyjęto wysokość karku. Założono również, że prąd rażeniowy przepływa na drodze kark-serce. Na rysunkach 3.33–3.34 zamieszczono rozkłady potencjału skalarnego dla dwóch omawianych przypadków (bez boi i z boją ochronną). Przebiegi przedstawiono dla czasu t = 10 µs, gdy wartość potencjału skalarnego osiąga maksimum.



Rysunek 3.33. Rozkład potencjału skalarnego dla osoby będącej w rzece (przypadek bez boi ochronnej) dla $t = 10 \ \mu s$



Rysunek 3.34. Rozkład potencjału skalarnego dla osoby będącej w rzece (przypadek z boją ochronną) dla $t = 10 \ \mu s$

Dla przypadku bez boi ochronnej potencjał skalarny w miejscu wyładowania osiągnął wartość 440 kV, a po zastosowaniu boi spadł trzykrotnie do 146 kV. Jako miarę napięcia rażeniowego przyjęto różnicę potencjałów między karkiem a sercem. Za poziom bezpieczny przyjęto wartość napięcia rażeniowego 1000 V – na podstawie krzywych fibrylacji komór serca (rys. 1.9). Analizując te rozkłady, można stwierdzić, że odległość bezpieczna między pływającym człowiekiem a punktem doziemnego wyładowania piorunowego wynosi 100 m w układzie bez boi ochronnej oraz 30 m w układzie z boją ochronną (rys. 3.35).



Rysunek 3.35. Rozkład napięcia rażeniowego dla osoby będącej w rzece (przypadek z boją ochronną) dla $t = 10 \ \mu s$

Podsumowując rozważania, można stwierdzić, że otwarte tereny, takie jak kąpieliska, powinny być wyposażone w urządzenia chroniące przed porażeniem na skutek wyładowania piorunowego. Przebywanie w wodzie podczas burzy jest bardzo niebezpieczne. Należy mieć na uwadze również to, że często dochodzi do porażenia wtedy, gdy jeszcze nie zaczął padać deszcz. Dlatego najprostszym i najbardziej skutecznym sposobem ochrony jest w tym przypadku wyjście z wody, ale – w praktyce – to zalecenie nie jest często przestrzegane. Obliczenia wykazały, że prosta boja wyposażona w mały system uziomowy zmniejsza obszar zagrożenia trzykrotnie. Nie ma przy tym znaczenia, czy boja i jej system uziomowy sięgają dna akwenu. Najważniejsze jest, że elementy te zmieniają rozkład pola potencjału, przez co zmniejsza się obszar, w którym przebywanie grozi migotaniem komór serca. Obszar chroniony od bezpośrednich wyładowań zależy od wysokości boi nad poziomem tafli wody.

3.7. Bezpieczeństwo ludzi w sąsiedztwie stacji bazowej GSM

Obliczenia rozkładów napieć krokowych i dotykowych przeprowadzono również dla wolnostojacej stacji bazowej GSM. Analizowano przypadek rzeczywistej, typowej stacji bazowej, składającej się z wieży o wysokości 60 m (na podstawie trójkatnej, zbudowanej z wykorzystaniem trzech słupów wsporczych), kontenera zawierającego aparaturę odbiorczo-nadawczą i siatki ogradzającej obszar 638 m². Rozpatrywano zagrożenie występujące podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego w wieżę. Metalowa konstrukcja wieży była głównym elementem odprowadzającym prad piorunowy do uziomu. Niewielka część prądu płyneła dodatkowo w przewodzie odprowadzająco-wyrównawczym, prowadzonym od szczytu wieży do szyny uziemiającej. Przewód ten jest połączony z konstrukcją wieży co kilka metrów na całej swojej długości. System uziomowy stacji składa się z połaczonych z soba otoków ułożonych wokół wieży oraz całego terenu stacji na głębokości 60 cm. Dodatkowo trzy słupy wsporcze wieży wraz ze stopami fundamentowymi zakopanymi na głębokości 3,2 m wzmacniaja uziom [9]. Aby wyznaczyć rozkład napieć rażeniowych, opracowano model matematyczny analizowanej stacji. Graficzną reprezentację modelu przedstawiono na rysunku 3.36. Do obliczeń przyjęto prady udarowe o wartości szczytowej 100 kA i kształcie 10/350 µs (III poziom ochrony), wprowadzone bezpośrednio w szczyt wieży. Na podstawie wyników pomiarów rezystywności gruntu w sąsiedztwie analizowanej stacji do obliczeń przyjęto model gruntu składający się z dwóch warstw o następujących właściwościach:

- pierwsza wierzchnia warstwa o grubości 2,5 m i rezystywności 262 Ω ·m;
- druga warstwa o rezystywności 1056 Ω ·m i nieskończonej grubości.

Na rysunkach 3.37–3.38 zamieszczono rozkłady napięć krokowych i dotykowych w chwili t=10 µs, kiedy zanikają oscylacje o dużych amplitudach i ustalone napięcia rażeniowe mają największą wartość. Rysunek 3.39 zawiera rozkład napięć krokowych dla kolejnych chwil z zachowaniem tej samej legendy, jaką zastosowano na rysunku 3.37 (dotyczy kolorystyki i przypisanej jej zakresowi napięć).



Rysunek 3.36. Graficzna reprezentacja modelu matematycznego analizowanej stacji bazowej GSM: a) widok 3D, b) widok z góry



Rysunek 3.37. Rozkład napięć krokowych na terenie stacji bazowej GSM dla $t = 10 \ \mu s$ (100 kA, 10/350 μs)



Rysunek 3.38. Rozkład napięć dotykowych na terenie stacji bazowej GSM dla $t = 10 \ \mu s$ (100 kA, 10/350 μs)

10 µs









Rysunek 3.39. Rozkład napięć krokowych na terenie stacji GSM: a) dla $t = 1 \mu s$, b) dla $t = 5 \mu s$, c) dla $t = 10 \mu s$, d) dla $t = 15 \mu s$, e) dla $t = 20 \mu s$, f) dla $t = 30 \mu s$, g) dla $t = 40 \mu s$, h) dla $t = 60 \mu s$

Najmniejsze wartości napięć krokowych stwierdza się bezpośrednio pod wieżą; mieszczą się one w przedziale od 2 kV do 20 kV. Największe wartości napięć krokowych wystąpiły w sąsiedztwie ogrodzenia stacji, co może być szczególnie groźne dla osób przebywających na zewnątrz. Z wyznaczonych rozkładów wynika, że wartość kąta tworzonego przez uziom otokowy ułożony wzdłuż ogrodzenia stacji wyznacza obszary, w których występują największe wartości napięć krokowych, dochodzące do 20 kV. Obszar rażenia dla najostrzejszego kąta 45° jest 3,5-krotnie większy od obszaru rażenia dla przeciwległego rozwartego kąta ogrodzenia. Stwierdzono bardzo szybkie zmniejszanie się napięć krokowych na terenie nie obejmowanym przez uziom stacji. W przypadku napięć dotykowych zaobserwowano odwrotną sytuację: im dalej od obszaru obejmowanego uziomem stacji, tym jest większe zagrożenie związane z napięciem dotykowym. Największe napięcia dotykowe sięgają 81 kV (w odległości 1 m, między stopami a ręką). Przy dotyku pośrednim z odległości 2 m rosną one do 135 kV.

W zależności od chwili czasu, dla którego prezentowane są wyniki obliczeń, wartości napięć rażeniowych są różne. Tak jak w poprzednich analizowanych przypadkach, wartości napięć rażeniowych zależą od rezystywności gruntu, efek-

tywnego obszaru pokrywanego przez system uziomowy obiektu, wartości szczytowej i kształtu prądu piorunowego.

Zestawiając wyniki obliczeń z wartościami granicznymi napięć krokowych, można stwierdzić, że przebywając w odległości do 5 m od ogrodzenia stacji GSM podczas wyładowania piorunowego, można być narażonym na migotanie komór serca. Tak jak w poprzednio analizowanych przypadkach, każdorazowe dotknięcie jakiegokolwiek metalowego elementu podczas wyładowania piorunowego doprowadzi do migotania komór serca, gdyż spodziewane wartości napięć dotykowych są rzędu dziesiątek kilowoltów. Tak więc wydaje się konieczne umieszczenie na ogrodzeniach stacji GSM tablic ostrzegawczych informujących o zagrożeniu ludzi przebywających w sąsiedztwie, gdyż często takie stacje są budowane w pobliżu zabudowań, w tym również budynków mieszkalnych.

3.8. Bezpieczeństwo ludzi na terenie stacji elektroenergetycznej WN

Szczegółowe obliczenia rozkładu napieć krokowych i dotykowych przeprowadzono również dla typowej polskiej stacji elektroenergetycznej 110/15 kV, budowanej według typowej dokumentacji KSU-3 [65]. Ewentualne modyfikacje dostosowawcze polegają na zmianie umiejscowienia urządzeń i budynków na terenie stacji. Model stacji elektroenergetycznej 110/15 kV przedstawiono na rysunek 3.40. Stacja KSU-3 ma rozdzielnię 110 kV, dwusekcyjną, jednosystemową, szynową, siedmiopolowa, zbudowana w oparciu o konstrukcje wsporcze wysokie i niskie żelbetowe z oszynowaniem linkowym AFL-6 240 mm². W skład rozdzielni 110 kV wchodza: dwa pola liniowe, pole łacznika sekcji, dwa pola transformatorowe, dwa stanowiska transformatorów i dwa pola pomiaru napiecia. Układ rozdzielni 110 kV jest typu H4. Uziemienie stacji wykonane jest z bednarki ocynkowanej; jest to uziom kratowy i wyrównawczy. Do obliczeń przyjeto prady udarowe o wartości szczytowej 100 kA i kształcie 10/350 µs (III poziom ochrony), wprowadzane w punkcie A (oznaczonym na rys. 3.40). Odpowiada to bezpośredniemu wyładowaniu piorunowemu w most szynowy sekcji 110 kV stacji. Do obliczeń przyjęto jednolity grunt o rezystywności 100 $\Omega \cdot m$.

Na rysunkach 3.42–3.44 przedstawiono wyniki obliczeń napięć krokowych i dotykowych występujących na terenie stacji. Podobnie jak w poprzednich przypadkach, największe wartości napięć krokowych (do 69 kV) występują na narożach stacji oraz w tych punktach na jej terenie, w których system uziomowy ma ostre załamania. Napięcia dotykowe największą wartość (do 60 kV) osiągają w najbliższym sąsiedztwie ogrodzenia stacji. Miejsca, w których przekroczone są dopuszczalne poziomy napięć krokowych, pokrywają się z trasą ułożenia bednarek, stanowiących system uziomowy stacji. Napięcie krokowe można uznać za bezpieczne (nie powodujące migotania komór serca) w odległości około 10 m od bednarki. Mając to na uwadze, można również stwierdzić, że istnieje niepomijalne ryzyko migotania komór serca, jeśli przebywa się w odległości dochodzącej do 10 m od ogrodzenia stacji podczas doziemnego wyładowania piorunowego. W przypadku napięć dotykowych sytuacja nie ulega zmianie. Dotykanie jakiekolwiek elementu metalowego podczas wyładowania piorunowego jest niebezpieczne dla życia. Tak więc, podobnie jak w stacji bazowej GSM, konieczne wydaje się umieszczenie na ogrodzeniach stacji tablic ostrzegawczych informujących ludzi przebywających w sąsiedztwie o zagrożeniu.



Rysunek 3.40. Graficzna reprezentacja modelu matematycznego stacji elektroenergetycznej 110/15kV: a) widok ogólny, b) pole liniowe, c) system uziomowy



Rysunek 3.41. Przebiegi napięć krokowych w budynku nastawni: 1 – na metalowych drzwiach wyjściowych, 2 – w rozdzielni 15 kV (sekcja 1)



Rysunek 3.42. Rozkład potencjału skalarnego na terenie stacji elektroenergetycznej WN/SN dla $t = 10 \ \mu s$ i $t = 100 \ \mu s (100 \ kA, 10/350 \ \mu s)$



Rysunek 3.43. Rozkład napięć krokowych na terenie stacji elektroenergetycznej WN/SN dla $t = 10 \ \mu s$ i $t = 100 \ \mu s (100 \ kA, 10/350 \ \mu s)$



Rysunek 3.44. Rozkład napięć dotykowych na terenie stacji elektroenergetycznej WN/SN dla $t = 10 \ \mu s$ i $t = 100 \ \mu s (100 \ kA, 10/350 \ \mu s)$

3.9. Bezpieczeństwo ludzi przebywających w sąsiedztwie elektroenergetycznych linii przesyłowych WN

Obliczenia napięć dotykowych i krokowych wywołanych przez prąd piorunowy przeprowadzono także dla obszaru w sąsiedztwie słupów elektroenergetycznej linii przesyłowej wysokiego napięcia. Bardzo często zdarza się bowiem, że taka linia przebiega w poprzek lub wzdłuż chodników, ścieżek leśnych lub rowerowych, pól uprawnych. Wiedza o poziomach napięć krokowych i dotykowych w sąsiedztwie słupów linii w obszarach zabudowanych jest konieczna ze względu na bezpieczeństwo zdrowia i życia osób postronnych.

Na ogół każda linia przesyłowa łączy się na obu końcach ze stacjami elektroenergetycznymi, a za ich pośrednictwem – z określonymi częściami systemu elektroenergetycznego. Mając na uwadze potencjalnie redukcyjny charakter systemu elektroenergetycznego na rozpływ prądów piorunowych w linii napowietrznej, a za jego pośrednictwem na poziomy napięć rażeniowych, podjęto również próbę oszacowania jego wpływu. Do analizy przyjęto model matematyczny wycinka systemu, który składa się z 16 słupów linii napowietrznej 110 kV z przęsłami o stałej długości (250 m) i jednej stacji elektroenergetycznej 110/15 kV (rys. 3.45).



Rysunek 3.45. Graficzna reprezentacja modelu matematycznego stacji elektroenergetycznej (widok z góry) wraz z dwiema liniami WN

W celu uproszczenia analizy przyjęto prostoliniowy przebieg linii WN w obu kierunkach (czyli linie promieniowe) oraz założono jednakową strukturę geologiczną gruntu na całej trasie linii. Źródłem zagrożenia był prąd piorunowy o wartości szczytowej 100 kA i kształcie 10/350 µs (III poziom ochrony) wprowadzony w most szynowy rozdzielnicy 110 kV na terenie stacji. Na rysunku 3.46 pokazano rozpływ prądów w kolejnych odcinkach przewodów odgromowych kolejnych przęseł linii napowietrznej wychodzących ze stacji WN. Wartość szczytowa prądu wypływającego linkami odgromowymi wynosi odpowiednio 12,3 kA i 11,7 kA, co stanowi 24% wartości szczytowej prądu piorunowego wprowadzonego.



Rysunek 3.46. Prąd piorunowy w przęsłach 1–8 linii napowietrznej wychodzącej ze stacji WN dla $t \in <2;2000>\mu$ s, udar prądowy 100 kA, 10/350 μ s

Zauważono, że rozległy system elektroenergetyczny sam w sobie nie stanowi czynnika redukcyjnego zagrożenia piorunowego. Z punktu widzenia napięć rażeniowych istotny jest wpływ uziomów słupów linii napowietrznych w promieniu 2 km od miejsca wprowadzenia prądu piorunowego, gdyż w tej odległości wartość rozpływającego się prądu wyładowania piorunowego w przewodach odgromowych spada stukrotnie. Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń i wcześniejszych wyników pomiarów przyjęto uproszczenie polegające na wycięciu analizowanej stacji z systemu elektroenergetycznego. Wydaje się, że takie postępowanie jest prawidłowe i niewprowadzające znaczących uchybień, a jedynie zaostrzające kryterium oceny zagrożenia piorunowego. Potwierdzają to również dostępne publikacje naukowe [45][47]. Do dalszej analizy przyjęto więc, że linia napowietrzna jest wycięta z systemu elektroenergetycznego.

Rozpatrzono odcinek linii napowietrznej z dwoma przewodami odgromowymi, o długości 3,8 km, składający się z 20 słupów typu H52 [10], oddalonych od siebie o 200 metrów. Prąd piorunowy o wartości 200 kA i kształcie 10/350 μ s (I poziom ochrony) został wprowadzony w środkowy słup analizowanego odcinka linii przesyłowej (rys. 3.47, 3.48). Do obliczeń przyjęto rezystywność gruntu równą 100 Ω ·m. Pominięto przypadki przeskoku odwrotnego na izolatorach i wpłynięcia części prądu piorunowego do przewodów fazowych. Analizowano więc jedynie najgroźniejszy przypadek bezpośredniego wyładowania w słup linii przesyłowej i jego wpływ na bezpieczeństwo. Obliczenia również wykonano metodą momentów, za pomocą pakietu CDEGS. Na rysunkach 3.49 i 3.50 przedstawiono rozkłady napięć krokowych i dotykowych dla trzech kolejnych słupów linii przesyłowej WN.



Rysunek 3.47. Analizowana napowietrzna elektroenegetyczna linia przesyłowa 220 kV



Rysunek 3.48. Graficzna reprezentacja modelu matematycznego słupa elektroenergetycznego linii przesyłowej: a) szkic rzeczywistego słupa typu H52 [10], b) i c) graficzna reprezentacja modelu matematycznego (widok 2D i 3D)

Na podstawie analizy rozkładów napięć rażeniowych można stwierdzić, że największe zagrożenie napięciami krokowymi występuje na narożach słupów linii. W tych miejscach napięcie krokowe osiąga wartość 128 kV. Krytyczne poziomy napięć krokowych występują bezpośrednio nad systemem uziomowym słupów i w odległości 25 metrów od jego obrysu.

Wartości napięć dotykowych rosną wraz z oddalaniem się od konstrukcji nośnej słupa. Rozkłady tych napięć pozwalają również określić zagrożenie przy tzw. dotyku pośrednim (w odległości większej niż 1 m od dostępnych części metalowych). W przeciwieństwie do napięć krokowych, napięcia dotykowe są najmniejsze przy narożach słupa. Wynika to z konstrukcji fundamentów słupa i rozkładu potencjału skalarnego w jego bezpośrednim sąsiedztwie. Rozkład napięć krokowych i dotykowych silnie zależy od rezystywności gruntu i obszaru zajmowanego przez układ uziomowy.

a)







Rysunek 3.49. Rozkłady napięć krokowych w pobliżu słupa H52 elektroenergetycznej linii napowietrznej 220 kV dla t=10 µs (200kA, 10/350µs): a) słup 1–1, b) słup 1–2, c) słup 1–3

b)





Rysunek 3.50. Rozkłady napięć dotykowych w pobliżu słupa H52 elektroenergetycznej linii napowietrznej 220 kV dla t=10 µs (200kA, 10/350µs): a) słup 1–1, b) słup 1–2, c) słup 1–3

Symulacje wykazały, że został przekroczony dopuszczalny poziom napięcia krokowego wg Neuhausa (15 kV) w promieniu 25 m od słupa linii przesyłowej. Porównując poziom napięć krokowych wg [79], należy uznać, że został on przekroczony w promieniu 10 metrów od środka słupa. Wynika stąd, że – bez względu na przyjęte kryterium oceny – zagrożenie piorunowe spada do akceptowalnego poziomu w odległości 25 metrów od słupa linii przesyłowej. Każdorazowe dotknięcie ręką jakiegokolwiek elementu metalowego jest niebezpieczne dla życia ludzi, gdyż wartości napięć dotykowych zdecydowanie przewyższają dopuszczalne poziomy wg [79]. Podobne zagrożenia wystąpią również w przypadku linii przesyłowych o innych napięciach znamionowych (110 kV, 400 kV). Napięcia rażeniowe zmienią się stosownie do rozległości systemu uziomowego słupów i ich rezystancji.

W przypadku sąsiedztwa słupów linii przesyłowej i obiektów budowlanych poziomy napięć rażeniowych nie powinny ulec znaczącej zmianie, niemniej jednak prawdopodobieństwo przebywania ludzi na zagrożonym obszarze jest większe, a przez to wzrasta ryzyko porażenia.

3.10. Bezpieczeństwo ludzi w pobliżu urządzenia piorunochronnego obiektu budowlanego

Aby móc przeanalizować zagrożenie ludzi stwarzane przez napięcia dotykowe i krokowe, przeprowadzono szczegółowe obliczenia dla obiektu budowlanego o wymiarach 40 m x 15 m oraz wysokości 28 m, z typowym urządzeniem piorunochronnym. Uziom otokowy budynku został w pierwszej konfiguracji ułożony w odległości 1 m od obrysu obiektu, na głębokości 0,5 m. Na rysunku 3.51 zamieszczono graficzną reprezentację modelu matematycznego zastosowanego w analizie. Do ochrony przed bezpośrednim wyładowaniem i do odprowadzania prądu piorunowego wykorzystano siatkę zwodów o wymiarach oka 9,5 m x 12,5 m oraz układ 10 przewodów odprowadzających. Siatka i zwody były wykonane z drutu stalowego o średnicy 8 mm.



Rysunek 3.51. Graficzna reprezentacja analizowanego modelu matematycznego obiektu budowlanego wraz z urządzeniem piorunochronnym [76]

Do obliczeń przyjęto prądy udarowe o wartości szczytowej 100 kA i kształcie 10/350 µs wprowadzane do środka (punkt A) i naroża (punkt B) systemu ochrony odgromowej na dachu analizowanego budynku (rys. 3.52).



Rysunek 3.52. Wymiary geometryczne urządzenia piorunochronnego poddawanego analizie: a) urządzenie piorunochronne z jednym otokiem, b) urządzenie piorunochronne z czterema otokami

W celu dokładnego odwzorowania rzeczywistych warunków eksploatacyjnych obliczenia przeprowadzono dla różnych rodzajów gruntów:

- gruntu jednorodnego o rezystywności 100 Ω ·m (rys. 3.53a),
- gruntu dwuwarstwowego odwzorowującego wierzchnią asfaltową warstwę izolacyjną o grubości 5 cm i rezystywności 5000 Ω·m, dla pozostałej części gruntu przyjęto rezystywność równą 100 Ω·m (rys. 3.53b).



Rysunek 3.53. Dwie struktury gruntu wykorzystane w obliczeniach: a) grunt jednorodny o rezystywności 100 Ω ·m, b) grunt dwuwarstwowy (pierwsza warstwa o grubości 5 cm i rezystywności równej 5 k Ω ·m, druga warstwa jednorodna o rezystywności równej 100 Ω ·m)

Analogicznie do dotychczas analizowanych przykładów, rozkłady napięć rażeniowych przedstawiono dla chwili $t = 10 \ \mu$ s, dla której zanikają oscylacje. Na rysunku 3.54 przedstawiono przebiegi napięć krokowych na powierzchni gruntu dla jednego uziomu otokowego wokół budynku (grunt jednorodny o rezystywności 100 Ω ·m), w narożu budynku (punkt 1) oraz w odległości 5, 10 i 15 metrów od naroża (punkty 2,3,4).



Rysunek 3.54. Przebiegi napięć krokowych na powierzchni gruntu dla jednego uziomu otokowego wokół budynku (grunt jednorodny o rezystywności 100 Ω ·m): punkt 1 – bezpośrednio przy przewodzie odprowadzającym, punkty 2–4 – oddalone o 5, 10, 15 metrów od naroża
W celu oceny wpływu zalecanych przez normy ochrony odgromowej rozwiązań systemu uziomowego na rozkłady napięć krokowych w sąsiedztwie budynku przeanalizowano systemy uziomowe składające się z 1, 2, 3 i 4 uziomów otokowych. Zasady rozmieszczania tych uziomów w gruncie przedstawiono na rysunku 2.2. Tworząc powyższe systemy uziomowe, uwzględniono zalecane sposoby zmniejszania rezystancji uziomu, prowadzące do ograniczania napięć krokowych. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 3.55–3.58.

Rozkłady napięć krokowych dla opisanego dwuwarstwowego gruntu pokazują rysunki 3.59–3.61; prąd wyładowania doziemnego wprowadzono w punkcie A, oznaczonym na rysunku 3.52 (środek budynku). Na rysunkach 3.62–3.64 zaprezentowano wyniki obliczeń dla dwuwarstwowej struktury gruntu dla prądu wyładowania doziemnego wprowadzonego do punktu B, oznaczonego na rysunku 3.52, a odpowiadającego najgorszemu przypadkowi trafienia w róg budynku.



Rysunek 3.55. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla jednego uziomu otokowego wokół budynku; grunt jednorodny o rezystywności 100 Ω ·m



Rysunek 3.56. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla dwóch uziomów otokowych wokół budynku; grunt jednorodny $100 \Omega \cdot m$



Rysunek 3.57. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla trzech uziomów otokowych wokół budynku; grunt jednorodny $100 \Omega \cdot m$



Rysunek 3.58. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla czterech uziomów otokowych wokół budynku; grunt jednorodny $100 \Omega \cdot m$



Rysunek 3.59. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla jednego uziomu otokowego wokół budynku; grunt dwuwarstwowy 5 k Ω ·m i 100 Ω ·m



Rysunek 3.60. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla dwóch uziomów otokowych; grunt dwuwarstwowy 5 k Ω ·m i 100 Ω ·m



Rysunek 3.61. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla trzech uziomów otokowych; grunt dwuwarstwowy 5 k Ω ·m i 100 Ω ·m



Rysunek 3.62. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla jednego uziomu otokowego; grunt dwuwarstwowy 5 k Ω ·m i 100 Ω ·m



Rysunek 3.63. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla dwóch uziomów otokowych; grunt dwuwarstwowy 5 k Ω ·m i 100 Ω ·m



Rysunek 3.64. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla trzech uziomów otokowych; grunt dwuwarstwowy 5 k Ω ·m i 100 Ω ·m

W tabeli 3.3 zestawiono maksymalne wartości napięć krokowych dla dwóch analizowanych struktur gruntu i dwóch punktów wprowadzenia prądu udarowego.

stwowego	I -

Dodaoi	Najwię	kowego		
Kodzaj układu uziemiającego	Grunt jednolity ρ=100 Ω·m Udar w punkcie A (środek)	Grunt dwuwarstwowy ρ ₁ =5 kΩ·m i ρ ₂ =100 Ω·m Udar w punkcie A (środek)	Grunt dwuwarstwowy ρ ₁ =5 kΩ·m i ρ ₂ =100 Ω·m Udar w punkcie B (naroże)	
1 otok	37,2	43,0	114,6	
2 otoki	11,9	13,2	71,6	
3 otoki	6,9	7,4	64,8	
4 otoki	4,4	4,9	63,6	

Analizując otrzymane wyniki, można dojść do wniosku, że 5 cm asfaltu położonego na powierzchni gruntu w otoczeniu budynku powoduje wzrost napięć krokowych o około 10%. W przypadku wyładowania w środek budynku napięcia krokowe są znacznie mniejsze niż w przypadku trafienia w naroże budynku. Największa względna różnica pomiędzy wartościami napięć krokowych w przypadku wprowadzenia prądu w środek i naroże dachu budynku wynosi 260%.

Wzrost napięć krokowych z powodu dodania warstwy asfaltu skłonił autora do przeprowadzenia obliczeń dla trójwarstwowej struktury gruntu zawierającej (rys. 3.65):

- 1 warstwę półprzewodzącą o grubości 2 mm i małej rezystywności, równej 2 Ω·m, symulującej asfalt pokryty wodą,
- 2 warstwę asfaltu o grubości 5 cm i rezystywności 5000 Ω ·m,
- 3 warstwę gruntu o jednolitej rezystywności 100 Ω ·m.



Rysunek 3.65. Trójwarstwowa struktura gruntu z powierzchnią półprzewodzącą

Wyniki obliczeń dla gruntu z wierzchnią warstwą półprzewodzącą, dla uziomu z jednym otokiem, przedstawiono na rysunku 3.66. Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że największa wartość napięcia krokowego zmniejszyła się z 114,6 kV do 53,1 kV po dołożeniu warstwy półprzewodzącej o rezystywności 2 Ω ·m (prąd wprowadzono w punkcie B, czyli w narożu budynku).

Podsumowując przedstawione rozkłady, można wysnuć wniosek, że wartości napięć krokowych zależą w znaczący sposób od struktury geometrycznej układu uziomowego. Dokładając dodatkowe otoki, można zredukować napięcia krokowe nawet 8–9-krotnie. Wierzchnia warstwa asfaltu pogarsza sytuację, powodując zwiększanie się wartości napięć krokowych. Powyższe wyniki są w opozycji do wytycznych norm ochrony odgromowej w zakresie minimalizacji zagrożenia napięciami krokowymi. Zdaniem autora i innych badaczy na przeszkodzie stoi chociażby ograniczona wytrzymałość elektryczna warstwy asfaltu, na przykład tylko 2000 V dla 50 mm warstwy asfaltu przeciętnej jakości [102][103]. Wyniki przeprowadzonych przez autora analiz wskazują, że można temu zapobiec, wprowadzając dodatkową warstwę półprzewodzącą zamiast asfaltowej.



Rysunek 3.66. Rozkład największych wartości napięć krokowych na powierzchni gruntu dla jednego uziomu otokowego wokół budynku; grunt trzywarstwowy 2 $\Omega \cdot m$, 5 k $\Omega \cdot m$ i 100 $\Omega \cdot m$

W sytuacji wyładowania piorunowego w środek LPS (ang. *Lighting Protection System* – system ochrony odgromowej) budynku (punkt A) poziomy dopuszczalnych napięć krokowych (bez względu na określające je dokumenty) zostały przekroczone w przypadku zastosowania uziomu składającego się z jednego otoku. Uziom składający się z dwóch otoków zmniejsza na tyle wartości napięć krokowych, że żaden z poziomów dopuszczalnych napięć krokowych nie będzie przekroczony. Przy wyładowaniu piorunowym w naroże budynku napięcia krokowe zmniejszają się do akceptowalnych poziomów dopiero w odległości 15 metrów od naroża – bez względu na liczbę dodatkowych otoków (od jednego do czterech).

Podobną analizę przeprowadzono dla napięć dotykowych wokół analizowanego obiektu w odległości 1 metra od przewodu odprowadzającego, gdyż tylko wówczas różnica potencjałów między punktami jest odzwierciedleniem definicji napięcia dotykowego (rys. 3.67).



Rysunek 3.67. Niebezpieczeństwo wywołane przez napięcie dotykowe w sąsiedztwie zwodu pionowego [14]: 1 – przewód odprowadzający prąd piorunowy do ziemi, 2 – system uziomowy, 3 – człowiek dotykający przewodu

Pozostałe parametry symulacji przyjęto takie same. Na rysunkach 3.68–3.71 przedstawiono rozkład napięć dotykowych dla rezystywności gruntu 100 Ω ·m i prądu wprowadzonego w środku LPS na dachu obiektu (punkt A na rys. 3.52). Wyniki porównawcze napięć dotykowych dla analizowanego przypadku zestawiono w tabeli 3.4.

Tabela 3.4.	Zestawienie	maksymalnych	wartości	napięć	dotykowych	dla	jednolitego	gruntu	o rezy-
stywności 10	00 Ω ∙m								

Rodzaj układu uziemiającego (liczba otoków)	Maksymalna wartość napięcia dotykowego [kV]
1	76,9
2	26,4
3	14,9
4	9,8



Rysunek 3.68. Rozkład największych wartości napięć dotykowych na powierzchni gruntu dla jednego uziomu otokowego wokół budynku; grunt jednorodny o rezystywności 100 Ω ·m



Rysunek 3.69. Rozkład największych wartości napięć dotykowych na powierzchni gruntu dla dwóch uziomów otokowych wokół budynku; grunt jednorodny o rezystywności 100 Ω ·m



Rysunek 3.70. Rozkład największych wartości napięć dotykowych na powierzchni gruntu dla trzech uziomów otokowych wokół budynku; grunt jednorodny o rezystywności 100 Ω ·m



Rysunek 3.71. Rozkład największych wartości napięć dotykowych na powierzchni gruntu dla czterech uziomów otokowych wokół budynku; grunt jednorodny o rezystywności 100 Ω ·m

Zestawiając wyniki obliczeń z przedstawionymi w rozdziale drugim poziomami granicznymi migotania komór serca, można wywnioskować, że we wszystkich rozpatrywanych przypadkach – po dotknięciu metalowego elementu budynku – przekracza się próg migotania komór serca. Zagrożenie napięciami dotykowymi występuje w odległości 1 metra od przewodu odprowadzającego.

W analizowanym przypadku kąt, pod jakim ułożono uziom pomiędzy przyległymi bokami, wynosił dokładnie 90°. Wcześniejsze analizy rozkładu potencjałów na terenie stacji elektroenergetycznej WN/SN wykazały, że każde odstępstwo od kąta prostego przy układaniu uziomu powoduje zwiększenie wartości szczytowych napięć rażeniowych [77]. Stąd też należy mieć na uwadze, że przedstawione wyniki mogą być większe dla systemu uziomowego budynku, w którym kąt, pod jakim ułożono uziom, jest inny niż 90°.

3.11. Metody redukcji napięć krokowych

Uwzględniając uzyskane wyniki obliczeń napięć rażeniowych, a w szczególności wyniki otrzymane dla obiektu budowlanego, stacji elektroenergetycznej WN i stacji bazowej GSM, można zauważyć, że napięcia dotykowe i krokowe są największe w bezpośrednim sąsiedztwie naroży systemów uziomowych. Obszary te decydują w głównej mierze o przekroczeniu dopuszczalnych poziomów napięć rażeniowych.

Skłania to do poszukiwania bardziej skutecznych metod ograniczania wartości szczytowych napięć krokowych i dotykowych w miejscach najbardziej narażonych. Można tego dokonać, stosując metody sztucznego kształtowania rozkładu potencjału na powierzchni gruntu poprzez selektywne i wybiórcze wzmacnianie uziomu w punktach krytycznych. Dalsze rozważania prowadzone będą dla stacji elektroenergetycznych, w których opisana sytuacja występuje bardzo często. Chcąc jak najlepiej kształtować rozkład potencjałów, przyjęto na podstawie dokumentacji stacji, że kąt ułożenia sąsiednich ścian uziomu jest równy 65°. Założono również, że analizowany system uziomowy nie jest połączony z innymi uziomami naturalnymi i sztucznymi. Kryterium oceny skuteczności kształtowania rozkładu napięć rażeniowych jest przy takich założeniach bardziej ostre.

Zaproponowane metody modyfikacji systemu uziomowego, mające na celu minimalizację obszaru występowania groźnych dla ludzi napięć rażeniowych, mogą być także zastosowane w innych miejscach i dla innych obiektów.

Obliczenia dla różnych wariantów modyfikujących system uziomowy przeprowadzono dla najprostszej i najczęściej spotykanej konfiguracji (jeden uziom otokowy, rezystywność gruntu 100 Ω ·m) ze zmienionym kątem naroża z 90° do 65° (dodatkowe zaostrzenie kryterium doboru); prąd piorunowy wprowadzono w środek analizowanego systemu uziomowego stacji elektroenergetycznej WN (rys. 3.72).



Rysunek 3.72. Model systemu uziomowego stacji 110/15 kV przyjęty do obliczeń (widok 2D)

Przykładowe wyniki obliczeń dla kilku z 35 zaproponowanych wariantów modyfikacji naroża systemu uziomowego przedstawiono na rysunku 3.73. Pozostałe analizowane warianty zamieszczono w załączniku (rys. A1 – A36). Każdy kolor na rozkładzie oznacza inny przedział wartości napięcia krokowego. Całkowity przedział napięciowy podzielono na 10 części. Wyznaczone pola powierzchni zajmowane przez określony kolor wyznaczono za pomocą algorytmu przedstawionego na rysunku 3.74. Jako jednostkę pola powierzchni przyjęto 1 pixel².

Algorytm wyznaczania optymalnego sposobu redukcji napięć krokowych bazuje na wynikach obliczeń rozkładów napięć krokowych, przy założeniu takiej samej skali napięciowej we wszystkich rozpatrywanych przypadkach.

Jakość systemu uziomowego można oszacować na podstawie zaproponowanego przez autora tzw. współczynnika rażenia napięciem krokowym, określanego dla analizowanego terenu.

$$k_{r} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{i}{n} \cdot P_{i}U_{n}}{\left(\sum_{i=1}^{n} P_{i}\right)U_{n}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{i}{n} \cdot P_{i}}{\sum_{i=1}^{n} P_{i}},$$
(3.12)

gdzie:

- n liczba przedziałów, na które podzielono cały zakres napięcia krokowego (liczba kolorów),
- P_i pole powierzchni zajmowane przez obszar o określonym napięciu krokowym (danym kolorze),
- U_n napięcie krokowe przyporządkowane progowi napięcia (danemu kolorowi na rysunku).

a) b) 68 671 c) d) f) e)

Rysunek 3.73. Różne sposoby redukcji napięć krokowych poddane analizie: a) oryginalny system uziomowy rozpatrywanego naroża; b) dodatkowy uziom pionowy o długości 5 m umieszczony w narożu; c) dodatkowy uziom poziomy położony w kierunku na zewnątrz stacji o długości 3 m; d) dodatkowy uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz o długości 3 m; e) dodatkowy uziom poziomy w kształcie trójkąta równobocznego; f) dodatkowy uziom poziomy położony do wewnątrz o długości 6 m



Rysunek 3.74. Algorytm wyznaczania optymalnego sposobu redukcji napięć krokowych

Jest on wprost proporcjonalny do pola powierzchni, na którym jest przekroczona wartość dopuszczalna uznana za próg bezpieczeństwa i odwrotnie proporcjonalna do pola powierzchni całkowitej analizowanego terenu.

W najgorszym przypadku, gdy na całym analizowanym terenie przekroczone są dopuszczalne wartości napięć krokowych, współczynnik przyjmuje wartość $k_r = 1$. Jeśli w żadnym miejscu analizowanego terenu nie dochodzi do przekroczenia dopuszczalnych wartości napięć krokowych, wartość współczynnika $k_r = 0$.

Drugim proponowanym przez autora kryterium oceny jakości modyfikacji systemu uziomowego jest współczynnik rażenia przy największej wartości napięcia krokowego k_{pmax} , równy stosunkowi pól o największej i najmniejszej wartości napięcia krokowego na danym obszarze, przy założeniu, że dany obszar jest podzielony na trzy niezerowe strefy rażenia. Współczynnik rażenia:

$$k_{p\max} = \frac{P_{MAX}}{P_{MIN}}, \qquad (3.13)$$

a przy podziale na dwie strefy rażenia:

$$k_{p \max 2} = \frac{P_{MAX} + P_{MED}}{P_{MIN}},$$
 (3.14)

gdzie: $P_{MAX} = P_1 + P_{10} + P_5 + P_6$ – pole powierzchni zajmowane przez obszar o największych wartościach napięcia krokowego, $P_{MED} = P_8 + P_4 + P_9$ – pole powierzchni zajmowane przez obszar o pośrednich wartościach napięcia krokowego, $P_{MIN} = P_0 + P_2 + P_7$ – pole powierzchni zajmowane przez obszar o najmniejszych wartościach napięcia krokowego.

Powyższe kryteria pozwalają ocenić i wybrać optymalny sposób modyfikacji systemu uziomowego redukujący napięcia krokowe. Poniżej przedstawiono wyniki obliczeń zaproponowanych przez autora współczynników k_r i k_p (rys. 3.75–3.77).



 $\mbox{Rysunek}$ 3.75. Zestawienie wartości współczynnika k_{pmax} określającego poziom redukcji napięć krokowych



 $\mbox{Rysunek}$ 3.76. Zestawienie wartości współczynnika k_{pmax2} określającego poziom redukcji napięć krokowych



Rysunek 3.77. Zestawienie wartości współczynnika kr określającego poziom redukcji napięć krokowych

Przedstawione powyżej rozważania wskazują, że optymalnym pod względem minimalizacji obszaru rażenia napięciem krokowym jest zaproponowany 17 wariant modyfikacji systemu uziomowego (rys. 4.78).



Rysunek 3.78. Optymalny pod kątem obszaru rażenia napięciem krokowym sposób modyfikacji systemu uziomowego stacji – uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz, składający się 5 elementów o długości 3 m

3.12. Metoda redukcji napięć dotykowych

W normie PN–EN 62305–3 [85] stwierdzono, że nawet poprawnie wykonane urządzenie piorunochronne może w pewnych warunkach stwarzać zagrożenie napięciami dotykowymi. W takiej sytuacji zaleca się następujące sposoby redukcji napięć rażeniowych:

- izolowanie dostępnego przewodu odprowadzającego, zapewniające napięcie udarowe wytrzymywane o wartości szczytowej nie mniejszej niż 100 kV i kształcie 1,2/50 μs, np. usieciowanym polietylenem o grubości przynajmniej 3 mm;
- zmianę ułożenia przewodów odprowadzających prąd piorunowy;
- fizyczne ograniczenie dostępu lub ustawienie tablic ostrzegających przed zagrożeniem;
- warstwa asfaltu o grubości 5 cm (lub żwiru o grubości 15 cm).

Należy zauważyć, że norma [85] w zakresie sposobu redukcji napięć dotykowych za pomocą izolowania przewodu odprowadzającego jest niejednoznaczna. Założono, że po zastosowaniu izolacji przewodu odprowadzającego ryzyko porażenia zostaje zniwelowane. Nie zdefiniowano odstępu bezpiecznego od przewodu odprowadzającego. Mając to wszystko na uwadze, poddano w tym podrozdziale weryfikacji wytyczne normy [85], przeprowadzając badania rur osłonowych jako zalecanej przez normę [85] metodę ograniczania niebezpiecznych napięć dotykowych. Znamienne jest, że dla budynku norma [85] definiuje odstęp bezpieczny, co dodatkowo potwierdza konieczność jej zweryfikowania w zakresie izolowania przewodu odprowadzającego.

3.12.1. Badania rur osłonowych

Dla potrzeb analizy bezpieczeństwa przeprowadzono badanie właściwości izolacyjnych kilku rodzajów rur osłonowych. Badano próbki rur osłonowych o średnicy Ø=20 mm i długościach 0,5 m i 1,5 m oraz grubościach ścianek odpowiednio:

- d=2,5 mm, grupa próbek rur oznaczona nr 1;
- d=2,8 mm, grupa próbek rur oznaczona nr 2;
- d=3,0 mm, grupa próbek rur oznaczona nr 3.



Rysunek 3.79. Próbki rur osłonowych wykonanych z PVC poddane badaniom

Do badań odporności udarowej rur osłonowych wykorzystano czterostopniowy generator napięciowy Marxa, który wytwarzał udary napięciowe o wymaganych normą [85] wartościach szczytowych 100 kV oraz w wybranych przypadkach wartościach do 200 kV i kształtach 1,2/50 µs (rys. 3.80, 3.81).

Napięcia udarowe doprowadzano do iskiernika ostrzowego umieszczanego wewnątrz badanych próbek (rys. 3.82). Na zewnątrz i na wysokości iskiernika umieszczono obejmę miedzianą, którą łączono bezpośrednio z systemem uziomowym.



Rysunek 3.80. Schemat czterostopniowego generatora w układzie Marxa: C_k – pojemności główne poszczególnych stopni generatora, r – rezystory ładujące międzystopniowe, I_z – iskierniki zapłonowe, r_m – rezystancje tłumiące, I_o – iskiernik zamykający, R_1 i R_2 – rezystory kształtujące udar napięciowy, C_2 – kondensator kształtujący udar, O_b – obiekt badany



Rysunek 3.81. Widok generatora udarów napięciowych wykorzystywanego do badań



Rysunek 3.82. Schemat blokowy stanowiska do badania odporności udarowej rur osłonowych PVC

Podczas badań obserwowano i rejestrowano zachowanie się próbek po doprowadzeniu napięcia udarowego. Poniżej zamieszczono zdjęcia poklatkowe wykonane w chwili przeskoków iskrowych po powierzchni próbek (rys. 3.83–3.88).



Rysunek 3.83. Zdjęcie poklatkowe próbki nr 1 podczas badań; $\emptyset = 20$ mm, l = 50 cm, grubość ścianki d = 2,5 mm, obejma w 2/3 długości próbki



Rysunek 3.84. Zdjęcie poklatkowe próbki nr 1 podczas badań; $\emptyset = 20$ mm, l = 50 cm, grubość ścianki d = 2,5 mm, obejma w 1/2 długości próbki



Rysunek 3.85. Zdjęcie poklatkowe próbki nr 2 podczas badań; Ø = 20 mm, l = 50 cm, grubość ścianki d = 2,8 mm, obejma w 2/3 długości próbki



Rysunek 3.86. Zdjęcie poklatkowe próbki nr 2 podczas badań; $\emptyset = 20$ mm, l = 50 cm, grubość ścianki d = 2,8 mm, orientacja pionowa, obejma w 2/3 długości próbki



Rysunek 3.87. Zdjęcie poklatkowe próbki nr 3 podczas badań; $\emptyset = 20$ mm, l = 50 cm, grubość ścianki d = 3 mm, obejma w 2/3 długości próbki



Rysunek 3.88. Zdjęcie poklatkowe próbki nr 3 podczas badań; $\emptyset = 20$ mm, l = 50 cm, grubość ścianki d = 3 mm, obejma w 2/3 długości próbki

W trakcie prowadzonych badań nie stwierdzono przebicia ścianek rur osłonowych PVC napięciem udarowym o wartości szczytowej $U_p = 100$ kV i kształcie 1,2/50 µs. Podczas prób wysokonapięciowych obserwowano wyładowania ślizgowe po powierzchni próbki. W przypadku napięcia udarowego 100 kV o kształcie 1,2/50 µs wyładowania ślizgowe osiągały długość do 75 cm. Nie zaobserwowano pęknięć, widocznych odprysków oraz zapalenia się próbek podczas badań.

Jeśli uwzględni się zapis normy [85] stwierdzający, że do ochrony odgromowej należy stosować *np. usieciowany polietylen o grubości przynajmniej 3 mm*, to do celów ochrony przed porażeniem można wykorzystać tylko rury o grubości ścianki 3 mm (próbka nr 3), mimo że pozostałe poddane próbom również spełniają wymogi normy [85].

Zgodnie z wymaganiami normy [85] przebadana próbka nr 3 (rura o grubości ścianki 3 mm) może być wykorzystywana w instalacjach odgromowych jako środek ochrony przed porażeniem istot żywych, jeśli będzie wystarczająco długa, tzn. uwzględniona zostanie wymagana długość 2,5 m (wysokość osoby z podniesioną ręką [84]) powiększona o co najmniej 75 cm.

Stosowanie izolacji w postaci rur osłonowych zgodnie z wytycznymi normy może uchronić przed porażeniem. Niemniej jednak bardzo groźne są obserwowane zjawiska wyładowań ślizgowych. Problem ten wymaga dalszych badań laboratoryjnych w układach odwzorowujących rzeczywiste warunki występujące podczas wyładowań piorunowych w obiekty budowlane.

4. POMIARY NAPIĘĆ RAŻENIOWYCH W WARUNKACH TERENOWYCH

W literaturze światowej brak jest wyników pomiarów napięć krokowych i dotykowych podczas rzeczywistych wyładowań piorunowych. Jest to spowodowane:

- małym prawdopodobieństwem bezpośredniego wyładowania piorunowego w obiekt, w którym w stanie wyczekującym znajdują się przyrządy pomiarowe,
- trudnościami w doborze właściwych ustawień sprzętu pomiarowego ze względu na charakter losowy obserwowanego zjawiska,
- trudnościami z przekonaniem osób odpowiedzialnych za obiekty do wydania zgody na przeprowadzenie tego rodzaju badań,
- koniecznością wykorzystania specjalnie dostosowanych generatorów prądów udarowych, w których kondensatory ładowane są do wysokich napięć,
- bezpieczeństwem osób oraz sprzętu pomiarowego podczas wykonywania badań,
- ograniczoną liczbą punktów pomiarowych,
- możliwością powstania fizycznych zniszczeń w obiektach poddanych badaniom.

Brak jest również wyników pomiarów z wykorzystaniem źródeł prądów o parametrach zbliżonych do prądu doziemnego wyładowania.

Uwzględniając powyższe uwagi, podjęto próbę przeprowadzenia badań napięć dotykowych i krokowych w pobliżu:

- przewodów odprowadzających rzeczywistego urządzenia piorunochronnego,
- wolnostojącego drzewa.

Wydaje się, że wyniki badań przedstawionych poniżej mają charakter unikatowy. Źródłem prądu udarowego był specjalnie skonstruowany w tym celu generator wysokiego napięcia. Podstawową jego zaletą jest pełna izolacja od ziemi i sieci zasilającej. Dzięki temu uniknięto powstania sprzężenia galwanicznego generatora udarowego poprzez system uziomowy z siecią zasilającą. Takie sprzężenie doprowadziłoby do otrzymywania błędnych wyników na skutek zjawisk falowych związanych z rozpływem prądu udarowego w obiekcie. W badaniach nie próbowano doprowadzić do przepływu prądu udarowego o parametrach zbliżonych do przebiegu prądu doziemnego wyładowania piorunowego ze względu na bezpieczeństwo osób i sprzętu podczas pomiarów.

4.1. Generator WN izolowany od ziemi

W prowadzonych pomiarach rzeczywistych napięć krokowych i dotykowych, pojawiających się przy przepływie prądu udarowego, wykorzystano generator prądów udarowych opracowany specjalnie do takich badań (przekonstruowany typowy generator prądowy). Schemat ideowy części wysokiego napięcia przedstawiono na rysunku 4.1.



Rysunek 4.1. Schemat generatora udarów prądowych WN; parametry elementów użytych do budowy generatora: $R_o = 1 \Omega$; $R_1 = 100 \Omega$; $R_2 = 4,7 k\Omega$; $R_3 = 1 k\Omega$; $L_o = 10,2 \mu$ H; $C_o = 26 \mu$ F

Zasada działania generatora polega na ładowaniu kondensatorów w układzie równoległym napięciem symetrycznym $\pm U_o$ poprzez szeregowo połączone rezystory R₃ i R₁. Po naładowaniu kondensatorów do zadanego przez użytkownika napięcia generator wyzwalany jest poprzez iskiernik Z_o, sterowany pneumatycznie. W następstwie tego dochodzi do sekwencyjnego wyzwolenia iskierników Z spolaryzowanych napięciowo poprzez rezystory R₂. W wyniku tej operacji wszystkie kondensatory C_o łączone są szeregowo, co przekłada się na ośmiokrotne zwiększenie napięcia na wyjściu generatora. Generator może pracować przy trzech zakresach napięcia, do którego mogą być ładowane pojemności C_o (ze względu na konstrukcję mechaniczną iskierników Z): 4,2 kV; 6,5 kV; 9,5 kV. Przekłada się to na następujące napięcie wyjściowe: 33,6 kV; 52 kV; 76 kV. Szeregowo połączone rezystory R_1 stanowią układ automatycznego rozładowywania kondensatorów C_o po zadziałaniu generatora.

Przystosowując opisany generator do badań narażeń piorunowych, wprowadzono następujące innowacje:

- w trakcie ładowania pojemności głównych C_o generator jest zasilany z sieci elektroenergetycznej, a po naładowaniu jest galwanicznie od niej odłączany,
- po odłączeniu zasilania możliwe jest wyzwolenie generatora,
- cały generator jest izolowany od ziemi (część wysoko- i niskonapięciowa).

Powyższe zmiany konstrukcyjne umożliwiły wykorzystanie generatora do badań w dowolnym miejscu, w którym może wystąpić wzrost potencjału wywołany przez przepływający prąd udarowy. Dzięki temu znalazł on zastosowanie w badaniach zagrożeń piorunowych – między innymi pozwala na wywołanie zjawisk wielkoprądowych w gruncie. Na rysunku 4.2 zamieszczono fotografię generatora.



Rysunek 4.2. Generator prądów udarowych izolowany od ziemi

4.2. Pomiary napięć krokowych w sąsiedztwie drzewa

Pomiary napięć krokowych występujących w sąsiedztwie drzewa przeprowadzono w małym parku. Do badań wybrano około 30-letni klon. Takie drzewo ma poziomy system korzeniowy, co jest najgorszym przypadkiem z punktu widzenia poziomu napięć krokowych (podrozdział 3.5). Płaski i płytki system korzeniowy nie sprzyja bowiem skutecznemu odprowadzaniu prądu wyładowania piorunowego do ziemi. Fotografię stanowiska pomiarowego w trakcie badań przedstawiono na rysunku 4.3.



Rysunek 4.3. Fotografia stanowiska do pomiaru napięć krokowych wokół klonu

Konfiguracja stanowiska badawczego została przedstawiona na rysunkach 4.4 i 4.5. Zacisk wyjściowy generatora WN podłączono za pośrednictwem miedzianej opaski do pnia drzewa na wysokości 1,3 m. Zacisk powrotny uziemiający generatora podłączono do czterech dodatkowych elektrod prądowych wbitych w ziemię w odległości od 4 do 14 metrów od pnia drzewa.



Rysunek 4.4. Plan sytuacyjny stanowiska badawczego podczas pomiaru napięć krokowych w pobliżu drzewa (widok z przodu)



Rysunek 4.5. Plan sytuacyjny stanowiska badawczego podczas pomiaru napięć krokowych w pobliżu drzewa (widok z góry)

Po naładowaniu i wyzwoleniu generatora uzyskano udar prądowy o kształcie 8,4/26,4 µs i wartości szczytowej 37 kA (rys. 4.6). Przepływ tego pradu wymusił powstanie napieć krokowych w sasiedztwie drzewa. Pomiary przeprowadzono za pomocą oscyloskopu Tektronix DPO 7254 [100], wysokonapięciowych sond Tektronix P6015A [100] oraz impulsowego bocznika pradowego. Do odwzorowania stóp człowieka wykorzystano dodatkowe elektrody napieciowe wbite w ziemie, stosownie do wymagań normy [87] (rys. 4.4 i 4.5). Pierwsza elektroda, stanowiaca swoiste odniesienie, została wbita w odległości 1 m od zewnętrznej części pnia drzewa. Kolejne elektrody umieszczono w odległości 30, 50 i 100 cm od pierwszej. Taki układ elektrod umożliwiał pomiar napięć krokowych dla trzech różnych układów stóp człowieka. Pierwszy z nich, gdy odległość między stopami wynosiła 30 cm, odtwarzał anatomiczna postawe człowieka stojacego prosto. Drugi, gdy odległość między stopami wynosiła 50 cm, odtwarzał krok człowieka idącego powoli. Trzeci, gdy odległość między stopami wynosiła 100 cm, odtwarzał długość kroku zgodnie z normatywną definicją napięcia krokowego. Wszystkie pomiary napięć krokowych przeprowadzono względem pierwszej elektrody odniesienia. Rezystywność gruntu podczas badań, wyznaczona metodą Wennera, wynosiła 233 Ω ·m.



Rysunek 4.6. Prąd wyjściowy z generatora podczas badań napięć krokowych w pobliżu drzewa (patrz rys. 4.4 i 4.5)

Wyniki pomiarów napięć krokowych zamieszczono na rysunkach 4.7 i 4.8. Wartość maksymalna napięcia krokowego zależy od czasu. W pierwszych kilku mikrosekundach napięcie krokowe osiąga wartość –4 kV dla najmniejszego rozstawu stóp (30 cm). Po kolejnych czternastu mikrosekundach napięcie krokowe zmienia polaryzację na dodatnią i uzyskuje wartość 2,8 kV dla normatywnego odstępu między stopami (100 cm). Obserwowane oscylacje mogą być związane z odbiciami fali napięciowej na drodze rozpływającego się prądu w stworzonym obwodzie.



Rysunek 4.7. Napięcie krokowe w pobliżu drzewa dla t∈<0;100>µs



Rysunek 4.8. Napięcie krokowe w pobliżu drzewa dla t∈<0;18>µs

4.3. Pomiary napięć rażeniowych w pobliżu hali produkcyjnej

Pomiary napięć krokowych i dotykowych przeprowadzono również w najbliższym sąsiedztwie hali produkcyjnej posiadającej typową instalację piorunochronną – w kwietniu 2012 roku, dwa dni po opadach deszczu. Rezystywność gruntu podczas pomiarów wynosiła 29 Ω ·m. Zacisk wysokiego napięcia generatora podłączono do urządzenia piorunochronnego na dachu hali, w jego punkcie centralnym. Drugi zacisk wyjściowy, zamykający obwód prądowy generatora, podłączono do dodatkowych stalowych elektrod prądowych o długości 50 cm, wbitych w odległości 25 m od obrysu hali, w linii prostej, równolegle do dłuższej ściany hali, w odległości 5 m od siebie (rys. 4.9). Generator podczas pomiarów znajdował się w środku budynku. Pomiaru prądu wyjściowego dokonano za pomocą impulsowego bocznika prądowego, podłączonego bezpośrednio do zacisków generatora.



Rysunek 4.9. Konfiguracja stanowiska badawczego podczas pomiarów: A – metalowe schody wejściowe do budynku, B – chodnik bezpośrednio prowadzący do wejścia

Napięcia krokowe i dotykowe mierzono oscyloskopem cyfrowym Tektronix DPO 7254 przy użyciu sond napięciowych Tektronix P6015A ($U_n=40 \text{ kV}$; pasmo przenoszenia 75 MHz) [100]. Do pomiaru napięć rażeniowych krokowych i dotykowych przyjęto, że rezystancja ciała człowieka wynosi 1000 Ω . Do jej odtworzenia w warunkach badawczych wykorzystano rezystor węglowy o takiej samej rezystancji. Imitację stóp człowieka uzyskano dzięki zastosowaniu sond wbitych w grunt na głębokość 20 cm, które zastępują odważniki o powierzchni 200 cm² i sile nacisku 250 N, stosownie do wymagań normy [86]. Ładując osiem pojemności głównych generatora do napięcia 6,5 kV ($U_{max}=8 \times 6,5 \text{ kV}=52 \text{ kV}$), uzyskano w układzie prąd o wartości szczytowej 4,7 kA 8/20 µs (rys. 4.11).

a)

 VkRQ

 Zst

 Stopa

b)

Rysunek 4.10. Konfiguracja stanowiska badawczego podczas pomiarów: V_{KR} – napięcie krokowe; Z_{ST} – impedancja stóp człowieka; R_C – rezystancja ciała człowieka



Rysunek 4.11. Prąd wyjściowy z generatora podczas pomiarów napięć rażeniowych

Pomiary przeprowadzono w kilkunastu punktach na terenie sąsiadującym bezpośrednio z halą produkcyjną. Na rysunkach 4.12–4.15 zaprezentowano wyniki otrzymane dla dwóch newralgicznych z punktu widzenia bezpieczeństwa miejsc oznaczonych jako A i B na rysunku 4.9. Należy zauważyć, że wartości szczytowe napięć dotykowych i dotykowych rażeniowych w najbliższym sąsiedztwie budynku są do siebie zbliżone. Dotyczy to również rażeniowych napięć krokowych i dotykowych. Na przebiegach napięć uwidaczniają się wyładowania niezupełne oraz przeskoki iskrowe w torze przepływu prądu (na połączeniach elementów tworzących obwód prądowy: generator – system ochrony odgromowej – przewody połączeniowe – dodatkowe elektrody prądowe).



Rysunek 4.12. Napięcie dotykowe na poręczy wejściowej do budynku w stosunku do metalowych schodów (punkt A)



Rysunek 4.13. Napięcie dotykowe rażeniowe na poręczy wejściowej do budynku w stosunku do metalowych schodów (punkt A)



Rysunek 4.14. Napięcie krokowe obok schodów wejściowych do budynku (punkt B)



Rysunek 4.15. Napięcie krokowe rażeniowe obok schodów wejściowych do budynku (punkt B)

Izolowany od ziemi generator wysokiego napięcia spowodował podniesienie potencjału systemu uziomowego o 52 kV, odwzorowując w sposób przybliżony zagrożenie napięciami dotykowymi i krokowymi podczas rzeczywistego wyładowania piorunowego w analizowany obiekt.

Przy wymuszeniu w postaci udaru prądowego 8/20 µs o wartości szczytowej 4,7 kA zarejestrowane napięcia dotykowe w sąsiedztwie hali produkcyjnej osiągnęły 2,78 kV, a napięcie krokowe 3,1 kV.

We wszystkich rozpatrywanych przypadkach napięcia dotykowe przekraczają próg, przy którym może dojść do migotania komór serca, natomiast napięcia krokowe nie przekroczyły wartości dopuszczalnych. Podczas badań zaobserwowano przeskoki iskrowe, widoczne również na zarejestrowanych przebiegach napięć krokowych i dotykowych.

Należy zauważyć, że rezystywność gruntu podczas pomiarów była dość mała w porównaniu z rezystywnością suchego gruntu. Gdyby grunt nie był tak nasiąknięty wodą, należałoby oczekiwać znacznie większych wartości napięć rażeniowych. Odnosząc wyniki pomiarów, a w szczególności prąd wyjściowy z generatora WN do rzeczywistych prądów doziemnych wyładowań piorunowych, można wnioskować, że wartości napięć krokowych i dotykowych mogą być nawet dwudziestokrotnie większe (ze względu na dysproporcję prądów uzyskanych z generatora WN i rzeczywistych prądów wyładowań piorunowych).

5. ZAGROŻENIE POŚREDNIE podczas wyładowań piorunowych

W dobie powszechnie wykorzystywanej techniki cyfrowej nadrzędną kontrolę nad stanem pracy różnorodnych systemów elektronicznych zapewniają mikroprocesorowe układy sterowania i nadzoru. Ich głównym zadaniem jest ciągłe kontrolowanie pracy urządzeń elektrycznych i elektronicznych. W przypadku wystąpienia anomalii podejmują one decyzję o konieczności zmiany sekwencji pracy urządzeń. Realizując tę funkcję, jednocześnie zapewniają ochronę ludzi i innych urządzeń znajdujących się w sąsiedztwie podczas stanów awaryjnych. Przesyłanie informacji kluczowych między poszczególnymi modułami zwiększa zagrożenie dla systemów sterowania i nadzoru. Ewentualne zakłócenia w łączności lub w skrajnych przypadkach awaria stopni wejściowych/wyjściowych może być przyczyną podjęcia błędnych decyzji w tych systemach, co z kolei może się przełożyć na niewłaściwe operacje wykonywane przez nie w sposób automatyczny. Zjawisko jest szczególnie niebezpieczne w przypadków systemów, których błędne działanie może stworzyć zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi.

W dalszej części rozdziału uwaga zostanie skoncentrowana na systemach ochrony przeciwpożarowej, a szczególnie na układach gaszenia gazem. Podczas doziemnych wyładowań piorunowych zdarzały się bowiem sytuacje niebezpieczne, w których na skutek błędnego działania urządzeń elektronicznych dochodziło na przykład do uwolnienia gazu przez system automatycznego gaszenia pożarów. Zdarzenia takie miały miejsce, nawet pomimo wykorzystywania:

- urządzeń, które spełniały wszystkie warunki zawarte w normach i zaleceniach krajowych oraz międzynarodowych z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej (ang. *Electromagnetic Compatibility* – EMC);
- poprawnie dobranych i zainstalowanych urządzeń do ograniczania przepięć w instalacji elektrycznej.

Na serii zdjęć poklatkowych pokazano całą sekwencję zdarzeń, która doprowadziła do zainicjowania zdarzenia niebezpiecznego dla zdrowia i życia. Pierwsza seria zdjęć z monitoringu przedstawia uchwyconą chwilę, w której doszło do wyładowania doziemnego w obiekt radionadawczy (rys. 5.1). Na kolejnych seriach zdjęć poklatkowych widać, jak niebezpieczne może stać się niekontrolowane i błędne zadziałanie systemu przeciwpożarowego (rys. 5.2–5.3).



Rysunek 5.1. Uchwycona przez kamery monitoringu chwila, w której doszło do bezpośredniego wyładowania w obiekt



Rysunek 5.2. Zdjęcia poklatkowe z systemu monitoringu pokazujące gaszenie fałszywego pożaru gazem

Szczegółowa analiza przedstawionego przypadku niekontrolowanego zadziałania systemu przeciwpożarowego uzupełniona pomiarami laboratoryjnymi wykazała, że prowadząc badania odporności przyłączy zasilania i sygnałowych centralek przeciwpożarowych na działanie udarów napięciowo-prądowych o kształcie 1,2/50 μ s – 8/20 μ s symulujących narażenia piorunowe, nie odwzorowuje się w pełni występującego zagrożenia.



Rysunek 5.3. Zdjęcia poklatkowe z system monitoringu pokazujące gaszenie fałszywego pożaru gazem w miejscu, w którym przebywają ludzie

Dokładne oględziny urządzeń elektronicznych po badaniach centrali wykazały uszkodzenie tylko kondensatora filtrującego w układzie powiadamiania i komunikacji GSM. Uszkodzenie to mogło powstać w wyniku nieznacznego przekroczenia napięcia znamionowego powyżej napięcia dopuszczalnej pracy kondensatora, a poniżej napięcia obniżonego warystora. Na tle całej płytki drukowanej modułu GSM awaria jest zauważalna tylko dla doświadczonego serwisanta. Nie powoduje ona utraty funkcjonalności układu, lecz tylko znacząco ogranicza prędkość przesyłu danych.



Rysunek 5.4. Zdjęcia uszkodzonego modułu GSM: a) widok całej centrali przeciwpożarowej podczas badań, b) "spuchnięty" kondensator
Aby wykryć przyczynę takiego zachowania centrali, przeprowadzono wiele prób, których zakres przekraczał wymagania norm EMC dotyczących systemów przeciwpożarowych. Wykonano między innymi badania oddziaływania impulsowego pola elektrycznego na czujkę i linię sygnałową. Źródłem impulsowego pola elektrycznego był wielostopniowy generator napięciowy pracujący w układzie Marxa. Linie sygnałowe umieszczano w różnych odległościach od iskiernika ostatniego stopnia generatora. Wytwarzane udary napięciowe o wartościach od 100 kV do 220 kV doprowadzano do iskiernika ostrzowego (rys. 5.5) i obserwowano za-kłócenia wywołane przez:

- napięcia udarowe (bez przeskoku na iskierniku),
- napięcia i prądy udarowe (wywołujące przeskok na iskierniku).



Rysunek 5.5. Schemat blokowy układu do badania oddziaływania impulsowego pola elektrycznego na czujkę i linię sygnałową centrali przeciwpożarowej



Rysunek 5.6. Przykłady zarejestrowanych przepięć między "przewodami gorącymi" 1 i 2 linii czujek dla napięcia udarowego 150 kV z przeskokiem na iskierniku; d – odległość czujki od generatora

Obserwacje przeprowadzone w laboratorium wykazały, że napięcia udarowe o większych wartościach szczytowych od zalecanych przez normy EMC powodowały losowo błędne pobudzenie centrali.

Normy dotyczące odporności udarowej urządzeń alarmowych i włamaniowych zakładają badanie urządzenia udarem 1,2/50 μ s – 8/20 μ s. Należy zauważyć, że całkowity czas trwania zakłócenia podczas bezpośredniego wyładowania może sięgać 0,5 s (pierwsze wyładowanie główne, kolejne składowe, składowa długo-trwała).

Szczegółowa analiza powyższego zjawiska pozwoliła ustalić, że pobudzenie centrali występowało w przypadkach:

- jednokrotnego spadku napięcia w linii łączącej czujki z centralą o czasie trwania 80 ms,
- kilkakrotnego spadku napięcia w linii łączącej czujki z centralą o czasie trwania 950 μs (czas przerwy między kolejnymi impulsami 400 μs).

Mając na uwadze powyższe wyniki obserwacji, konieczne jest badanie urządzeń udarami o dłuższym czasie trwania, niż to zakładają normy, aby dokładniej odzwierciedlić rzeczywiste warunki występujące podczas bezpośredniego wyładowania atmosferycznego.

PODSUMOWANIE

W umiarkowanej strefie klimatycznej praca na otwartym terenie, spacery oraz cała szeroko rozumiana turystyka, szczególnie górska, przy burzowej pogodzie stwarza realne niebezpieczeństwo porażenia na skutek wyładowania piorunowego. Sama obserwacja zjawiska z bliskiej odległości w wielu osobach budzi lęk i przerażenie. Obawy potęgują również media, które każdy przypadek porażenia szeroko nagłaśniają. Warto jest jednak wiedzieć, jak ustrzec się przed skutkami oddziaływania rozpływającego się prądu doziemnego wyładowania piorunowego, jak im przeciwdziałać oraz jak prawidłowo dobrać środki ochrony, aby ograniczyć możliwość porażenia i uniknąć najbardziej niebezpiecznego zjawiska, jakim jest migotanie komór serca.

Powszechnie znane są proste zalecenia dotyczące bezpiecznego zachowania się podczas burzy. Do nich należy zaliczyć:

- unikanie przebywania na terenach otwartych, na wodzie oraz w wodzie podczas burzy;
- jak najszybsze przejście do budynku lub samochodu;
- unikanie stania pod drzewem lub skałą.

W niniejszej monografii, wykorzystując wyniki obliczeń oraz badań laboratoryjnych i terenowych, starano się przedstawić szczegółowe informacje na temat bezpieczeństwa podczas wyładowań piorunowych oraz przeanalizować zalecane środki ochrony przed napięciami krokowymi i dotykowymi, mając na uwadze, iż nawet w normie [85] zapisano, że nie zawsze będą one skuteczne. Przeprowadzono obliczenia rozkładów napięć rażeniowych w pobliżu wolnostojącego masztu, słupa linii przesyłowej WN, stacji elektroenergetycznej oraz przekaźnikowej GSM, typowego budynku i różnego rodzaju drzew.

Zestawiając uzyskane wyniki obliczeń i mając na uwadze bezpieczeństwo ludzi podczas wyładowań piorunowych, można stwierdzić, iż należy przestrzegać dodatkowych, zestawionych poniżej, zaleceń:

- Nie należy dotykać żadnych metalowych elementów biorących udział w rozpływie prądu doziemnego wyładowania piorunowego.
- Bezpiecznym miejscem w parku jest metalowa ławka, na której wskazane jest usiąść w takiej pozycji, aby nie dotykać nogami ziemi. Wówczas dana osoba w przypadku wyładowania piorunowego znajdzie się na wysokim

potencjale. Spowoduje to, że nie zostanie narażona na niebezpieczne wartości napięć krokowych i dotykowych. Metalowe ławki mogą służyć więc jako element ochrony przed napięciami rażeniowymi podczas burzy.

- Podczas burzy należy znajdować się w odległości co najmniej 50 metrów od wysokich elementów architektonicznych (np.: maszty flagowe, drzewa).
- Bezpieczna odległość między pływającym człowiekiem a punktem doziemnego wyładowania piorunowego wynosi około 30 metrów.
- Akweny wodne powinny być wyposażone w urządzenia ograniczające strefę, w której może mieć miejsce porażenie na skutek wyładowania piorunowego. Obliczenia wykazały, iż prosta boja wyposażona w mały system uziomowy zmniejsza około 3-krotnie obszar rażenia.

Szczegółowe wyniki badań terenowych i obliczeń numerycznych oraz opracowane wnioski przedstawiono w poszczególnych rozdziałach monografii. Poniżej zestawiono podstawowe praktyczne spostrzeżenia, które można wykorzystać w celu poprawy bezpieczeństwa osób podczas doziemnych wyładowań piorunowych.

- Przeprowadzona analiza rozkładów napięć krokowych i dotykowych wykazała, że każde odstępstwo od kąta prostego przy układaniu uziomu powoduje zwiększenie wartości szczytowych napięć rażeniowych. Dla kąta 45° obszar rażenia jest 3,5-krotnie większy niż dla przeciwległego rozwartego kąta układu uziomowego.
- Zaobserwowano bardzo wyraźne zmniejszanie się napięć krokowych na terenie nie obejmowanym przez uziom obiektu.
- Napięcia krokowe przestają być niebezpieczne już po około 100 µs od początku przepływu prądu dla pierwszego wyładowania głównego.
- Wartości napięć rażeniowych zależą od rezystywności gruntu, obszaru zajmowanego przez system uziomowy obiektu, wartości szczytowej i kształtu prądu piorunowego.
- Miejsca, w których przekroczone są dopuszczalne poziomy napięć krokowych, pokrywają się z trasą ułożenia bednarek stanowiących system uziomowy.
- Wartości napięć krokowych zależą znacząco od struktury geometrycznej układu uziomowego.
- W przypadku urządzeń piorunochronnych na typowych obiektach budowlanych poziomy dopuszczalnych napięć krokowych są zawsze przekraczane w przypadku zastosowania uziomu składającego się z jednego otoku.
- Wzmocnienie uziomu o jeden dodatkowy otok zmniejsza wartości napięć krokowych; wówczas poziomy dopuszczalne nie zostaną przekroczone. Dokładając dodatkowe otoki, można zmniejszyć 8–9-krotnie wartości napięć krokowych.
- Wierzchnia warstwa asfaltu zwiększa wartości napięć krokowych.

- Warstwa półprzewodząca odpowiadająca mokrej powierzchni zmniejsza wartości napięć krokowych.
- Zestawiając wyniki obliczeń z krzywymi granicznymi migotania komór serca, można wywnioskować, że dla wszystkich rozpatrywanych obiektów po dotknięciu metalowego elementu budynku przekracza się próg migotania komór serca. To, czy dojdzie do migotania, zależy w głównej mierze od miejsca, w którym człowiek będzie się znajdował podczas wyładowania piorunowego.
- Sterowanie rozkładem potencjału systemu uziomowego pozwala zmniejszyć wielokrotnie ryzyko wystąpienia rażeniowego napięcia krokowego.
- W wyniku przepływu prądu udarowego przez elementy metalowe następuje erozja termiczna metalu, z którego zostały one wykonane. Obserwuje się znaczne iskrzenie na stykach poszczególnych sekcji konstrukcji metalowych podczas przepływu prądów udarowych o znacznych wartościach. Efekty "audiowizualne" mogą potęgować uczucie zagrożenia wśród ludzi.

W monografii wykazano, iż normy dotyczące ochrony odgromowej obiektów budowlanych w kwestii bezpieczeństwa ludzi wymagają istotnych zmian.

Przeprowadzona analiza zjawisk występujących podczas bezpośredniego wyładowania piorunowego ma bardzo złożony charakter. Jest to związane między innymi z nieliniowością i niesymetrią obiektów. Podjęte badania należy kontynuować w kierunku poszukiwania bardziej dokładnych, mniej pracochłonnych i czasochłonnych metod określania poziomu bezpieczeństwa podczas wyładowań piorunowych. Ich wyniki mogłyby znaleźć zastosowanie w projektowaniu nowych obiektów, znacznie bardziej nowoczesnych niż obecnie użytkowane i bardziej bezpiecznych.

Normy z zakresu ochrony odgromowej obiektów budowlanych w świetle przedstawionych analiz wymagają znaczących modyfikacji. Podniosą one poziom bezpieczeństwa ludzi podczas doziemnych wyładowań piorunowych.

LITERATURA

- [1] Buehl R., Majka A., Saferna J., Sakiel S., Strużyna J.: *Porażenia i oparzenia prądem i lukiem elektrycznym. Etiologia i pomoc przedlekarska.* WNT, Warszawa 1993.
- [2] Cooray V.: *Lightning Protection*. Institute of Electrical and Electronic Engineers, England, April 2009.
- [3] Dehn + Söhne Lightning Protection Guide. Revised 2nd edition. September 2007/2012.
- [4] Flisowski Z.: Technika wysokich napięć. WNT, Warszawa 1999.
- [5] Flisowski Z.: Trendy rozwojowe ochrony odgromowej budowli. Cz. I. Wyladowania piorunowe jako źródło zagrożenia. PWN, Warszawa 1986.
- [6] Gierlotka S.: *Wypadki porażenia ludzi od uderzenia pioruna*. "Elektro Info" nr 7–8/2011.
- [7] Kożuchowski P.: Analiza zagrożenia piorunowego w Polsce; praca dyplomowa magisterska. Politechnika Warszawska, Katedra Wysokich Napięć i Aparatów Elektrycznych, Warszawa 2006.
- [8] Markiewicz H.: Zagrożenie i ochrona od porażeń w instalacjach elektrycznych. WNT, Warszawa 2004.
- [9] Markowska R.: Analiza zagrożenia piorunowego urządzeń w obiektach radiokomunikacyjnych; rozprawa doktorska. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej 2006.
- [10] Niebrzydowski J.: Sieci elektroenergetyczne. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 1995.
- [11] Sowa A.W.: Kompleksowa ochrona odgromowa i przepięciowa. Wyd. II poprawione. Centralny Ośrodek Szkolenia i Wydawnictw SEP, Warszawa 2005.
- [12] Sowa A.W.: Ochrona urządzeń oraz systemów elektronicznych przed narażeniami piorunowymi. "Rozprawy Naukowe" nr 219. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2011.
- [13] Szpor S.: Ochrona odgromowa. T. 1. Wiadomości podstawowe. WNT, Warszawa 1973.
- [14] Szpor S.: Ochrona odgromowa. T. 3. Piorunochrony. WNT, Warszawa 1978.
- [15] Wood Handbook. United States Department of Agriculture 1999.

- [16] Wiater J.: Analiza zagrożenia piorunowego systemów sterowania i nadzoru stacji elektroenergetycznych; rozprawa doktorska. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2009.
- [17] Aguado M., Goiffon R., Laurrent D.: Accidents due to lightning: State of Art. 26th International Conference on Lightning Protection. ICLP 2002, Kraków.
- [18] Ala G., Buccheri P.: Evaluation of Human Body Effects on Dangerous Transient Ground Voltages in a Lightning Protection System. ICLP 98.
- [19] 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.
- [20] Amiri E., Hesamedin Sadeghi S.H., Moini R., Sheshyekani K., Shoory A.: *Transient behavior of grounding system against lightning currents: Human safety Aspects.* 29th International Conference on Lightning Protection. 23rd–26th June 2008 – Uppsala.
- [21] Andrews C., Berger G., Floret N., Ishikawa T., Kitagawa N., Ohashi M.: International Safety and Rescue Guide Against Lightning Hazards. 23th International Conference On Lightning Protection. ICLP 1996, Florence.
- [22] Andrews Ch.J.: The Origin of Remote Symptoms in Electrical and Lightning Injuries: An Attempt at Explanation and a Hypothesis for Testing. 30th International Conference on Lightning Protection – ICLP 2010 (Cagliari, September 13th–17th, 2010).
- [23] Balog E., Berta I.: A Theoretical Approach to Safety in Lightning Protection Based on Fuzzy Logic. 25th International Conference on Lightning Protection. ICLP 2000 Rhodes 18–22 September 2000.
- [24] Barannyk I., Shostak V., Tsybann S.: Lightning Accidents at the Bus Stop Shelters. 30th International Conference on Lightning Protection – ICLP 2010. Cagliari, September 13th–17th, 2010.
- [25] Brocke R., Hinrichsen V., Suchanek S., Gao J.: Step-voltage-optimized Lightning Protection Earth-termination Systems. Analysis and Simulation. 2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), Fortaleza, October 3–7, 2011.
- [26] Chandima Gomes Ch., Ahmed M., Hussain F., Abeysinghe K. R.: Lightning accidents and awareness in South Asia: Experience in Sri Lanka and Bangladesh. 28th International Conference on Lightning Protection. ICLP 2006 Kanazawa.
- [27] Cherington M.: *Lightning Injuries*. Fifth International Conference on Emergency Medicine, London, May 1994.
- [28] Chowdhuri P., Anderson J.G., Chisholm W.A., Field T.E., Ishii M., Martinez J.A., Marz McDaniel J., McDermott T.R., Mousa A.M., Narita T.,

Nichols D.K., Short T.A.: *Parameters of lightning strokes: a review.* "IEEE Transactions on Power Delivery" vol. 20, no. 1, Jan 2005; pp. 346–358.

- [29] Cooray V., Cooray C., Andrews C.J.: *Lightning caused injuries in humans*. "Journal of Electrostatics" 65 (2007), pp. 386–394.
- [30] Dalziel Charles F., Lee W.R.: *Lethal Electric Currents*. In: "IEEE Spectrum" 1969, February, pp. 44–50.
- [31] Dalziel Charles F., Lee W.R.: *Reevaluation of Lethal Electric Currents*. In: "IEEE Tran. Ind. Gen. Apple IGA-4" 1968, nr. 5, pp. 467–476.
- [32] Dawalibi F. P., Mitskevitch N.: Analysis and Validation of the Performance of Grounding Systems Buried in Soil Structures Containing Heterogeneous Volumes, Proceedings of the 3rd IASTED. International Conference Power And Energy Systems, September 3–5, 2003, Marbella, pp. 700–705.
- [33] Dawalibi F. P.: Analysis of Grounding Systems in Soils with Cylindrical Soil Volumes. "IEEE Transactions on Power Delivery" vol. 15, no. 3, July 2000, pp. 913–918.
- [34] Doytchev D.E., Szwillus G.: Combining task analysis and fault tree analysis for accident and incident analysis: A case study from Bulgaria. "Accident Analysis and Prevention" 41 (2009), pp. 1172–1179.
- [35] Elsom D.M.: *Deaths and injuries caused by lightning in the United Kingdom: analyses of two databases.* "Atmospheric Research" 56, 2001, pp. 325–334.
- [36] Flisowski Z., Mazzetti C.: An approximate method of assessment of the electric shock hazard by lightning strike. Proceedings, 18th International Conference on Lightning Protection, Munich, VDE-Verlag GmbH, Berlin, pp. 449–453.
- [37] Gao J., Munteanu I., Suchanek S., Müller W.F.O., Weiland T., Hinrichsen V.: Study on the Step Voltage Caused by Lightning Current with Postured Voxel-Based Human Body Models. Computation in Electromagnetics (CEM 2011), IET 8th International Conference.
- [38] Gomes C., Ab Kadir M.Z.A.: A theoretical approach to estimate the annual lightning hazards on human beings. "Atmospheric Research" 101, 2011, pp. 719–725.
- [39] Gomes Ch., Arturo Galvan Diego: Lightning protection scenarios of communication tower sites, human hazards and equipment damage. "Safety Science" 49, 2011, pp. 1355–1364.
- [40] Gourbiere E., Lapeyre E.: *Lightning accidents on camping sites in France*. 26th International Conference on Lightning Protection. ICLP 2002, Kraków.
- [41] Gourbiere E.: *Lightning Effects on Human Beings*. 27th International Conference On Lightning Protection. ICLP 2004, Avignon.
- [42] Gourbiere E.: *Lightning injury to human beings in France*. 24th International Conference on Lightning Protection. ICLP 1998, Birmingham.

- [43] Greev L. D.: Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems. "IEEE Transactions on Power Delivery" vol. 11, no. 2, pp. 815–823, April 1996.
- [44] Greev L. D.: Computer Analysis of Transient Voltages in Large Grounding Systems. "IEEE Transactions on Power Delivery" vol. 11, no. 2, pp. 815–823, April 1996.
- [45] Greev L., Filiposki V.: Zone of influence of ground potential rise on wireline communication installations in urban areas. "IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility", 18–22 Aug. 1997, pp. 580–585.
- [46] 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.
- [47] Heimbach M., Grcev L.D.: Grounding system analysis in transients programs applying electromagnetic field approach. "IEEE Transactions on Power Delivery" vol. 12, no. 1, Jan. 1997, pp. 186–193.
- [48] Kitagawa N., Ohashi M., Ishikawa T.: The Lightning Accidents that Involve Numerous People in the Vicinities of Struck Points. 26th International Conference on Lightning Protection. ICLP 2002, Kraków.
- [49] Kitagawa N., Ohashi M., Tsuyuki A., Ishikawa T., Nagai Y.: Lightning injuries caused by multi-strike-point thunderbolts. 23th International Conference On Lightning Protection. ICLP 1996, Florence.
- [50] Kitagawa N., Turumi S., Ishikawa T., Ohashi M.: *The nature of lightning discharges on human bodies and the basis for safety and protection.* 18th International Conference on Lightning Protection. ICLP 1985, Munich.
- [51] Kitagawa N.: Safety Guide Against Lightning Hazards. 20th ICLP International Conference on Lightning Protection. Interlaken, Switzerland, September 24–28, 1990.
- [52] Kitagawa N.: *The actual Mechanisms of so-called step voltage injuries*. ICLP 2000. Rhodes, 18–22 September 2000, pp.781–785.
- [53] Kithil R.: Lightning death and injuries at a military airfield: A case study. ICLP 98.
- [54] Kubilius D., Rimdeika R.: Simultaneous lightning injury in a group of people: Case report. Burns 38, 2012, pp. e9–e12.
- [55] Lee C.H., Sakis Meliopoulos A.P.: *Comparison of touch and step voltages between IEEE Std 80 and IEC 479–1.* "IEEE Proceedings on Generation Transmission Distribution" vol. 146, no. 5, September 1999.
- [56] Lewis A.M.E.: *Understanding the principles of lightning injuries*. "Journal of Emergency Nursing" vol. 23, no 6, December 1997.
- [57] Li-Hsiung Chen, Jiann-Fuh Chen, Tsorng-Juu Liang, Wen-I Wang: Calculation of ground resistance and step voltage for buried ground rod with insulation lead. "Electric Power Systems Research" 78, 2008, pp. 995–1007.

- [58] Łoboda M.: Lightning deaths and injuries in Poland in period of 2001–2006.
 29th International Conference on Lightning Protection. 23rd–26th June 2008
 – Uppsala, Sweden.
- [59] Ma J., Dawalibi F. P.: Analysis of Grounding Systems in Soils with Cylindrical Soil Volumes. "IEEE Transactions on Power Delivery" vol. 15, no. 3, July 2000, pp. 913–918.
- [60] Misbah N. R., Ab Kadir M. Z. A., Gomes C.: Modelling and Analysis of Different Aspectof Mechanisms in Lightning Injury. "IEEE" 2001.
- [61] Nayel M., Zhao J., Jinliang He, Zongyuan Cai, Qi Wang: *Study of Step and Touch Voltages in Resistive/Capacitive Ground due to Lightning Stroke*. CEEM'2006 Dalian.
- [62] Neuhaus H.: *Blitzschutzanlagen: Erlaute-rungen zu DIN 57 185/VDE 0185.* 1. Aufl. Berlin; Offenbach: VDE-Verlag, 1983.
- [63] Poljak D., Sesnić S., Birkić M., Kosor D.: Towards the model for the assessment of the current density induced in the human body due to the electric field irradiated from the rod struck by lightning. Software, Telecommunications and Computer Networks, 2007. SoftCOM 2007. 15th International Conference. 27–29 Sept. 2007.
- [64] Portela C.: Grounding Procedures to Assure People and Equipment Safety Against Lightning. 27th International Conference On Lightning Protection. ICLP 2004, Avignon.
- [65] Projekt stacji elektroenergetycznej 110/15kV typu KSU-3, Energoprojekt Kraków S.A.
- [66] Roya S. Nikjoo, Hesamedin Sadeghi S. H., Moini R.: Optimal Grounding Grid Design Considering Lightning Safety Indices. 30th International Conference on Lightning Protection – ICLP 2010. Cagliari, September 13th–17th, 2010.
- [67] Salari Filho J.C., Portela C.: Evaluation of Touch and Step Voltages Distributions at Vicinity of Grounding Systems Using a Frequency Domain Methodology. 27th International Conference On Lightning Protection. ICLP 2004, Avignon, France.
- [68] Santamaria F., Alarcon A., Roman F.: Analysis of a Lightning Accident Considering a Modified Human Body Model. 28th International Conference on Lightning Protection. ICLP 2006, Kanazawa.
- [69] Strojny J.: Modelling of the Human Body Charging and Discharging Circuit. International Conference on Lightning Protection 21st ICLP. Berlin, Germany, September 21–25, 1992.
- [70] Stružewski B., Stružewski P.: Lightning discharge not causing death as a significant hazard for human hearing organ. 18th International Conference On Lightning Protection. ICLP 1985, Munich, Germany.

- [71] Suchanek S., Hinrichsen V., Jing Gau, Munteanu I., Brocke R., Muller K.-P.: Auswirkungen von Schrittspannungen auf den Menschen. 9 VDE/ABB-Blitzchutztagung, 27–28 Oktober 2011 in Neu-Ulm.
- [72] Sueta H.E., Shigihara M., Caires L.E., Burani G.F., Nascimento W.J.D.: Effects of Lightning in Oil Plants Construction Sites – Step and Touch Voltage Simulation and Tests in Work Footwear. 2011 International Symposium on Lightning Protection (XI SIPDA), Fortaleza, Brazil, October 3–7, 2011.
- [73] Szczerbiński M.: Lightning hazards and risks to humans: some case studies. "Journal of Electrostatics" 59, 2003, pp. 15–23.
- [74] Szczerbiński M.: Numerical Estimation of Lightning Hazard to Humans Buring Outdoor Activity. 24th International Conference On Lightning Protection. ICLP 1998, Birmingham, England.
- [75] Tian Ch., Zhang Y., Cai L., Wang J., Huang S., Wang Y.: Lightning Transient Characteristics of a 500-kV Substation Grounding Grid. 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, November 1–4, 2011, Chengdu, China 2011.
- [76] Wiater J., Sowa A.: Life Hazard During a Direct Lightning Strike to LPS of Public Buildings. Lightning protection: SIPDA'2005: VIII International Symposium, Sao Paulo, November 21–25, 2005, Brazil.
- [77] Wiater J., Sowa A.: Sterowanie rozkładem pola potencjału na terenie stacji elektroenergetycznej 110/15kV [ref.]. Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze: SIECI'2004. V Konferencja Naukowo-Techniczna, Wrocław, 15–17.09.2004, pp. 253–258.
- [78] Zhou B., Heming R., Lihua S., Cheng G.: Calculation of Step Voltage Near Lightning Current. Radio Science Conference, 2004. Proceedings. 2004 Asia-Pacific. 24–27 Aug. 2004.
- [79] IEC Raport: Effects of Current Passing through the Human Body. IEC Publication 479–1/1984; 479–2/1987; Geneve.
- [80] IEC 62305–3:2005, Protection against lightning Part 3. Physical damage to structure and life hazard.
- [81] IEEE Std 80–2000: IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [82] PN-E-05115: Instalacje elektroenergetyczne prądu przemiennego o napięciu wyższym niż 1kV.
- [83] PN–EN 50164–1: Elementy urządzenia piorunochronnego (LPC). Cz. 1: Wymagania dotyczące elementów połączeniowych.
- [84] PN-EN 62305-1:2011: Ochrona odgromowa. Cz. 1: Zasady ogólne.
- [85] PN-EN 62305-3:2011: Ochrona odgromowa. Cz. 3: Uszkodzenia fizyczne obiektów i zagrożenie życia.
- [86] PN-IEC 60364: Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych.

- [87] PN-IEC 60364-4-41:2000: Instalacje elektryczne w obiektach budowlanych. Ochrona dla zapewnienia bezpieczeństwa. Ochrona przeciwporażeniowa.
- [88] PN-IEC 61312-1: Ochrona przed piorunowym impulsem elektromagnetycznym. Zasady ogólne.
- [89] CDEGS Current Distribution, Electromagnetic Interference, Grounding and Soil Structure Analysis. Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal Canada.
- [90] Computation of electromagnetic fields created by rectilinear current sources in a stratified medium.; Safe Engineering Services. HIFREQ theory. Materiały niepublikowane.
- [91] FFTSES User's Manual: Fast Fourier Transform, Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, Canada.
- [92] HIFREQ User's Manual: Frequency Domain Analysis of Buried Conductor Networks. Safe Engineering Services & Technologies Ltd., Montreal, Canada.
- [93] National Climatic Data Center, U.S. Department of Commerce.
- [94] http://corrosion-doctors.org/Water-Glossary/Glossary.htm.
- [95] http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity.
- [96] http://www.encyklopedialesna.pl.
- [97] http://www.nlm.nih.gov/research/visible/visible_human.html. The National Library of Medicine's Visible Human Project. Website.
- [98] http://www.sestech.com.
- [99] http://www.straightdope.com/columns/read/2263/is-lightning-really-thatdangerous-to-swimmers.
- [100] http://www.tek.com/ Test and Measurement Equipment from Tektronix.
- [101] https://www.nowcast.de/.
- [102] http://www.edwardmusial.info/pliki/ochrona_pporazeniowa_sn.pdf.
- [103] http://www.ena.asn.au/udocs/2010/07/EG-0-Power-System-Earthing-Guidefor-website.pdf – EG-0 Power system earthing guide. Part 1: Management principles. Draft – August 2009. Energy Networks Association, Australia.

ZAŁĄCZNIK A



Rys. A1. Oryginalny system uziomowy



Rys. A3. Uziom poziomy położony w kierunku na zewnątrz stacji – dł. 3m



Rys. A5. Uziom poziomy w kształcie trójkąta równobocznego – przeciętego

Rys. A2. Uziom pionowy - dł. 5m (szpila na rogu)



Rys. A4. Uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz – dł. 3m



Rys. A6. Uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz stacji – dł. 6m



Rys. A7. Uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz – dł. 1,5m



Rys. A8. Uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz – dł. 1,5m i wzmocniony uziomem pionowym (szpilą) o dł. 1,5m



Rys. A9. Uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz – dł. 1,5m i wzmocniony uziomem pionowym (szpilą) o dł. 5m



Rys. A10. Potrójny uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz – dł. każdego elementu 3m



Rys. A11. Potrójny uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz zamknięty na końcu – dł. każdego elementu 3m



Rys. A12. Potrójny uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz zamknięty podwójnie – dł. każdego elementu 3m



Rys. A13. Potrójny uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz zamknięty potrójnie – dł. każdego elementu 3m



Rys. A15. Potrójny uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz wzmocniony na rogu uziomem pionowym (szpila) od dł. 1,5m



Rys. A14. Potrójny uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz zamknięty poczwórnie – dł. każdego elementu 3m



Rys. A16. Potrójny uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz wzmocniony na rogu uziomem pionowym (szpila) od dł. 5m



Rys. A17. Potrójny uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz i na zewnątrz – dł. każdego elementu 3m



Rys. A18. Potrójny uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz i na zewnątrz wzmocniony na rogu uziomem pionowym (szpila) od dł. 5m



Rys. A19. Potrójny uziom poziomy położony w kierunku do wewnątrz i na zewnątrz wzmocniony na rogu uziomem pionowym (szpila) od dł. 20m

Rys. A20. Układ uziomowy w kształcie przeciętej strzały



Rys. A21. Układ uziomowy w kształcie ekwipotencjalnej gwiazdy



Rys. A22. Układ uziomowy w kształcie ekwipotencjalnej kratownicy o oczku 0,5m



Rys. A23. Układ uziomowy w kształcie trójkąta równobocznego a=4m



Rys. A24. Układ uziomowy w kształcie trójkąta równobocznego a=4m na wpół przeciętego uziomem poziomym



Rys. A25. Układ uziomowy w kształcie trójkąta równobocznego a=4m na wpół przeciętego uziomem poziomym (od przeciwnej strony)



Rys. A26. Układ uziomowy w kształcie półkola zakończony ostrzem



Rys. A27. Układ uziomowy w kształcie półkola z potrójnym wzmocnieniem na zewnątrz



Rys. A28. Układ uziomowy w kształcie łuku z potrójnym wzmocnieniem na zewnątrz



Rys. A29. Układ wzmocniony uziomem w kształcie litery "E"



Rys. A30. Narože stacji tylko w kształcie litery "E"



Rys. A31. Naroże stacji tylko w kształcie litery "E" wzmocnione na zewnątrz uziomem poziomym o dł. 1m



Rys. A33. Naroże stacji tylko w kształcie liter "vE"



Rys. A32. Naroże stacji tylko w kształcie litery "E" wzmocnione na zewnątrz uziomem poziomym o dł. 3m



Rys. A34. Naroże stacji tylko w kształcie litery "E" wzmocnione do wewnątrz uziomem poziomym o dł. 3m



Rys. A35. Naroże stacji tylko w kształcie litery "C" wzmocnione na zewnątrz uziomem poziomym o dł. 4m



Rys. A36. Naroże stacji tylko w kształcie litery "C" wzmocnione do wewnątrz 15-stoma uziomami poziomymi o dł. 0,5m

STRESZCZENIE

Wyładowania piorunowe w powszechnym odczuciu mają charakter nagły i niespodziewany. W dobie powszechnie dostępnych środków masowego przekazu informacje o porażeniu ludzi oraz szkodach materialnych wywołanych przez wyładowanie piorunowe są szeroko rozpowszechniane, co potęguje obawy o zdrowie i życie podczas burzy. Niestety, bardzo często przekazywane informacje nie są prawdziwe i zgodne z wiedzą naukową dotyczącą zagrożeń stwarzanych przez wyładowania piorunowe oraz szeroko pojętych aspektów medycznych. Nierzetelne informacje powodują okresowy i gwałtowny wzrost zainteresowania problematyką bezpieczeństwa podczas doziemnych wyładowań piorunowych i zwrócenie szczególnej uwagi na uwarunkowania bezpiecznego zachowania się podczas burzy. Ze względu na charakter zachodzących zjawisk sprawa nie zawsze jest jednak prosta i oczywista.

Różnorodne zagadnienia dotyczące bezpieczeństwa człowieka podczas doziemnych wyładowań piorunowych oraz sposobów jego ograniczania zostały opracowane kompleksowo w powyższej monografii. Szczegółowo przedstawiono:

- skutki rażenia człowieka prądem wyładowania piorunowego;
- charakterystykę rozwiązań stosowanych do ochrony zdrowia i życia ludzkiego podczas wyładowań piorunowych;
- ocenę zagrożeń ludzi w pobliżu wolno stojącego masztu, pod drzewami, w wodzie, w sąsiedztwie stacji bazowej GSM, stacji elektroenergetycznej, napowietrznych linii przesyłowych oraz w pobliżu urządzenia piorunochronnego obiektu budowlanego;
- metody redukcji napięć krokowych i dotykowych.

Publikacja ta przeznaczona jest w szczególności dla projektantów i instalatorów urządzeń piorunochronnych, lekarzy medycyny sądowej, personelu inżynieryjno-technicznego z zakresu elektrotechniki. Zebrany materiał może również zainteresować osoby pragnące poszerzyć swoją wiedzę z zakresu bezpieczeństwa człowieka podczas wyładowań piorunowych.

SUMMARY

Generally lightning strikes have got a sudden and unexpected nature. In present time when mass-media delivers information about electric shock caused by lightning strike without any delay detail knowledge about lighting safety is necessary. This also creates life fear in society. Unfortunately very often happens that those information's are not true, not complete and not compliant with science knowledge. Medical aspects of news are simple. Victim survived or not. Unreliable information's causes periodically and rapid increase attraction about lightning electric shock hazard. Most of questions concentrates on one subject. How to correctly behave during thunderstorm. This problem is not so easy as it seems to be.

Variety of lighting hazard problems during lightning strikes were studied in this book. Many aspects of proper behaviour during thunderstorm were presented. In details book characterizes below listed problems.

- How lighting current effects on human body.
- How to protect human being during lighting strikes.
- In details book describes lightning hazard nearby free standing pole and tree, in the water, nearby GSM broadcasting station, high voltage substation, overhead transmission lines, lighting protection system localized on the building, indirect effects of lightning strike.
- Touch and step voltage decreasing methods were analyzed and presented too.

This book is appropriate for design engineers, lightning protection system installers, forensic investigators. All collected in this book information's can be also useful for everyone who would like to know more about safety during a thunderstorm.