

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
WARSZAWA-MIEDZESZYN

**BIULETYN**

**INFORMACYJNY**

**1(226)**

**1985**



MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

---

# BIULETYN INFORMACYJNY

ROK 25

WARSZAWA 1985

NR 1/226/

---

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI  
Branżowy Ośrodek  
Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Redakcja Biuletynu Informacyjnego

---

Redaktor Naczelny - doc. dr inż. Krystyn Plewko  
Z-ca Redaktora Naczelnego - dr inż. Stanisław Sońta

Redaktorzy działów:

dr inż. Alina Karwowska-Lamparska,  
mgr inż. Mirosław Żurawski

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Branżowy Ośrodek

Informacji Naukowej, Technicznej i Ekonomicznej

Warszawa - Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

ISSN 0299-1046

Redaktor: mgr K. Juszkiewicz

Montaż tekstu: B. Drabik

---

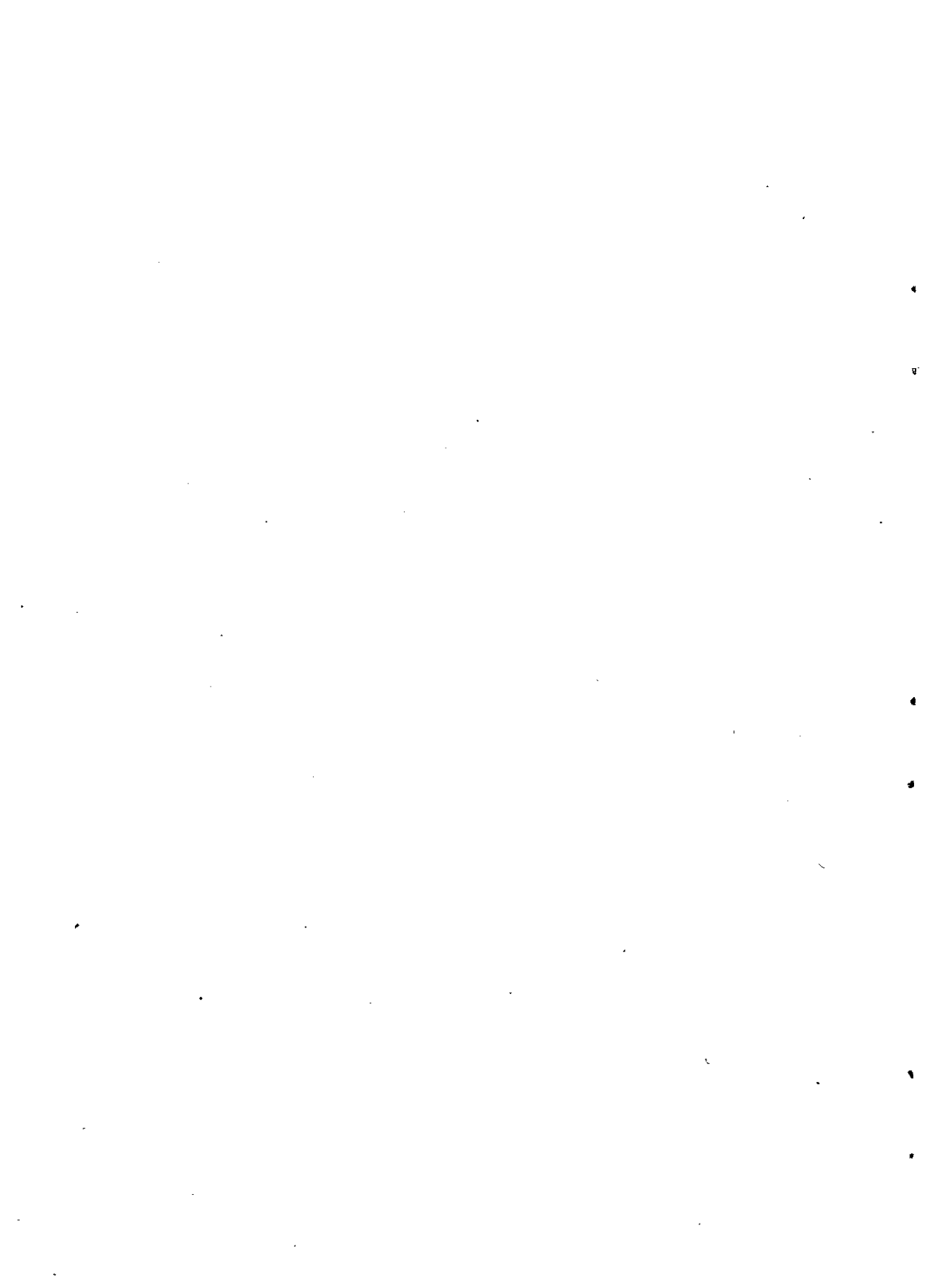
Dział Wydawniczy Instytutu Łączności  
Format B5. Nakład 625. Wpłynęło do  
Działu Wydawniczego 1985.07.05 r.  
Druk ukończono we wrześniu 1985 r.

Paweł Buda

NARAŻENIA ELEKTROMAGNETYCZNE - PIORUN

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Wprowadzenie	1
2. Główne zjawiska elektryczne w atmosferze	2
2.1. "Stałe" pole elektryczne	2
2.2. Ładunki swobodne	3
2.3. Bilans prądowy	4
2.4. Chmura burzowa	6
2.5. Elektryzacja chmury	7
2.6. Wyładowanie elektryczne	10
3. Piorun	13
3.1. Nowe metody badania wyładowań piorunowych	13
3.2. Wyniki badań	15
3.3. Oddziaływanie pioruna na odległość	19
3.4. Analiza widmowa	23
3.5. Stopień bezpośredniego zagrożenia /Prawdopodobieństwo uderzenia pioruna/	26
4. Symulacja	30
4.1. Wrażliwość urządzeń	30
4.2. Symulatory	30
5. Zakończenie	34
Wykaz literatury	35
Zestawienie ciekawszych referatów przedstawionych na międzynarodowych sympozjach kompatybilności elektromagnetycznej od 1979 roku	37



## NARAŻENIA ELEKTROMAGNETYCZNE - PIORUN

### 1. WPROWADZENIE

W miarę rozwoju cywilizacji społeczeństwo uzależnia się coraz bardziej od sprawności działania systemów i urządzeń telekomunikacyjnych i ogólnie - elektronicznych. Sprawność ta jest tym większa, im mniejsza jest ich podatność na narażenia elektromagnetyczne środowiska, stąd obserwuje się w ciągu ostatnich kilkunastu lat zwiększone zainteresowanie problematyką kompatybilności elektromagnetycznej.

We wszystkich krajach rozwiniętych wymagania dotyczące kompatybilności elektromagnetycznej sprzętu elektronicznego należą dzisiaj do kategorii wymagań podstawowych, takich jak wymagania na narażenia klimatyczne czy mechaniczne.

Ustalenie wymagań na odporność sprzętu na narażenia elektromagnetyczne wymaga następujących działań:

- 1/ poznania zjawisk wywołujących narażenia elektromagnetyczne;
- 2/ poznania mechanizmów oddziaływania tych zjawisk na materiały, elementy, urządzenia i systemy;
- 3/ opanowania technik pomiarowych;
- 4/ określenia sposobów oceny zagrożeń;
- 5/ określenia zasad klasyfikacji narażeń elektromagnetycznych oraz odporności na te narażenia;
- 6/ opracowania wymagań na odporność sprzętu.

Narażenia elektromagnetyczne można ogólnie podzielić na dwie grupy:

- a/ narażenia powstające w wyniku naturalnych zjawisk elektromagnetycznych, takich jak piorun czy zorza polarna;
- b/ narażenia powstające w wyniku działalności człowieka, jak np.: impuls elektromagnetyczny powodowany przez wybuch nuklearny

/NEMP/, wyładowanie elektrostatyczne /ESD/, celowe lub niezamierzone promieniowanie energii wysokich częstotliwości.

Jednym z najbardziej istotnych naturalnych zjawisk odpowiedzialnych za uszkodzenia urządzeń i systemów telekomunikacyjnych jest wyładowanie piorunowe.

W referacie przedstawiono podstawowe informacje o wyładowaniu atmosferycznym, jego parametrach oraz o narażeniach elektromagnetycznych powodowanych przez piorun. Omówienie mechanizmu wyładowania atmosferycznego i związanych z nim zagrożeń wymaga przypomnienia kilku faktów z dziedziny tzw. elektryczności ziemskiej.

## 2. GŁÓWNE ZJAWISKA ELEKTRYCZNE W ATMOSFERZE

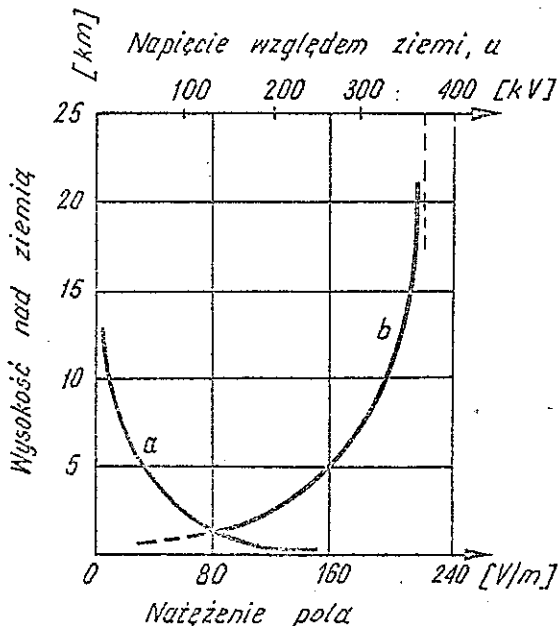
### 2.1. "Stałe" pole elektryczne [5], [6], [2], [12], [13]

W otoczeniu kuli ziemskiej istnieje naturalne pole elektryczne, którego natężenie zmienia się w zależności od warunków atmosferycznych oraz czasu i miejsca obserwacji. Przy bezwietrznej pogodzie i bezchmurnym niebie ziemia jest naładowana ujemnie w stosunku do górnych warstw atmosfery, a linie sił pola są prostopadłe do jej powierzchni. W tych warunkach pole określa się jako normalne. Obraz pola jest lokalnie odkształcony przez nierówności terenu. Natężenie pola zależy od szerokości geograficznej: największe jest przy szerokościach średnich i maleje w kierunku równika i biegunów. Charakteryzując pole elektryczne ziemi wprowadza się pojęcie "stałego pola elektrycznego". Dla danego obszaru natężenie pola "stałego" jest wartością średnią z wyników pomiarów natężenia pola normalnego, powtarzanych wielokrotnie w ciągu określonego czasu. W pobliżu powierzchni ziemi średnia wartość natężenia pola normalnego wynosi od ok. 100 do 160 V/m. Wartość ta maleje szybko wraz z wysokością nad powierzchnią ziemi i już na wysokości 5 km jest równa ok. 10 V/m, zaś na 10 km tylko 3-5 V/m. Różnica potencjałów pomiędzy ziemią a warstwą atmosfery, dla której wartość natężenia pola jest pomijalnie mała /praktycznie dla wysokości



powyżej 20 km/, wynosi ok. 380 kV [5] /według innych autorów np. [6] ok. 210 kV/.

Rys. 1. przedstawia natężenie pola elektrycznego ziemi w funkcji odległości od powierzchni ziemi oraz napięcie  $U$  względem ziemi w zależności od wysokości nad powierzchnią ziemi.



Rys. 1. Przebieg: a/ natężenia pola elektrycznego ziemi, b/ napięcia  $U$  względem ziemi w funkcji wysokości nad powierzchnią ładu [5]

## 2.2. Ładunki swobodne [6], [2], [4], [12]

Ziemia znajduje się pod nieustannym wpływem naturalnego promieniowania kosmicznego. Promieniowanie to, jonizując atmosferę, doprowadza do powstania swobodnych ładunków elektrycznych - jonów dodatnich i elektronów. Dolne warstwy atmosfery są dodatkowo jonizowane wskutek promieniowania radioaktywnego Ziemi. Obok jonów powstałych w wyniku bombardowania kosmicznego istnieją w atmosferze inne rodzaje jonów nazywane "ją-

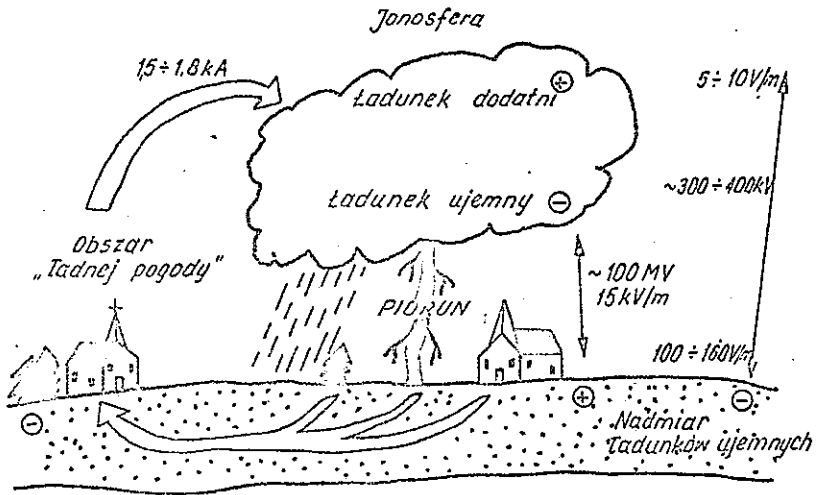
drami", z racji stosunkowo dużych rozmiarów. Są to cząstki kurzu lub opadów atmosferycznych, które unosząc się w powietrzu wychwytyują ładunki małych jonów. Przewodnictwo elektryczne powietrza spowodowane obecnością swobodnych jonów rośnie szybko wraz z wysokością nad poziomem ziemi. Dzieje się tak z kilku powodów. Małe jony, wytworzone przez promieniowanie kosmiczne, są bardziej ruchliwe niż duże jądra. Nad powierzchnią ziemi, gdzie wiatry wzbijają kurze i człowiek zanieczyszcza atmosferę, jąder jest dużo. Wychwytyują one ładunki małych jonów, a ponieważ są wolniejsze, zmniejsza się wypadkowe przewodnictwo. Im wyżej nad powierzchnią ziemi, tym intensywniejsza jest jonizacja powietrza spowodowana promieniowaniem kosmicznym. Gdy gęstość powietrza maleje, wydłuża się średnia droga swobodna jonów i mogą one przebyć dłuższą trasę zanim się zderzą: tym sposobem wzrasta przewodnictwo atmosfery. Na wysokości 50 km przewodnictwo jest tak duże, że warstwa atmosfery powyżej tej granicy ma właściwości podobne do przewodników.

Swobodne ładunki pod wpływem pola elektrycznego poruszają się, tworząc prąd dopływający do ziemi i przynoszący do niej ładunek dodatni. Prąd ten, nazywany często "prądem ładnej pogody", ma gęstość rzędu  $10 \text{ pA/m}^2$ , co w skali kuli ziemskiej daje natężenie prądu ok. 1,5 - 1,8 kA [6], [4], [2]. Stwierdzono, że wypadkowe natężenie prądu jest w przybliżeniu stałe, a jego gęstość nie zależy od wysokości /do pewnej wysokości/ [2].

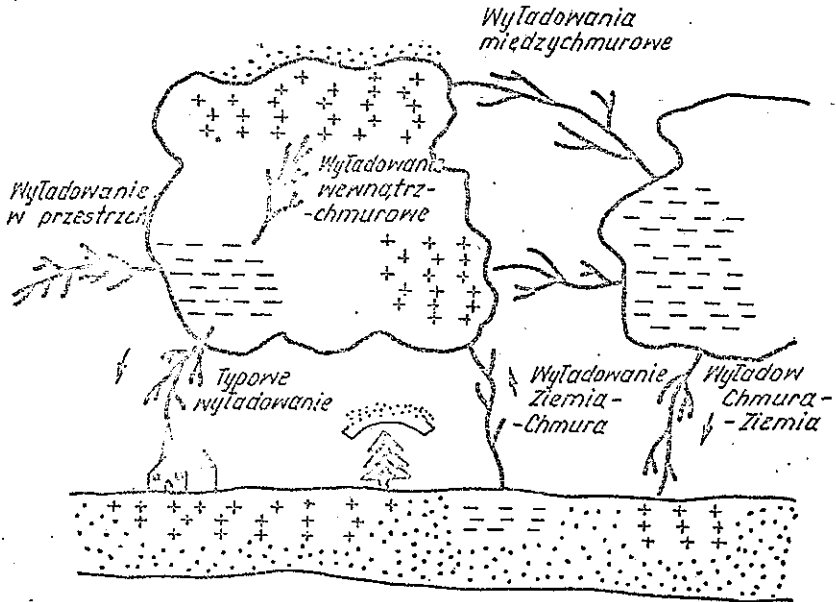
Teoretycznie ładunki dodatnie dopływające do powierzchni ziemi powinny szybko zobojętnić jej ładunek ujemny. Jednak tak się nie dzieje, a sprawa zachowania ładunku ujemnego ziemi przez długi czas stanowiła zagadkę.

### 2.3. Bilans prądowy [1], [2], [4], [6], [12]

Zachowanie ładunku ujemnego ziemi większość teorii przypisuje wyładowaniom atmosferycznym. Ocenia się, że równocześnie na ziemi jest ok. 1500-1800 burz i że w każdej sekundzie zachodzi ok. 100 uderzeń pioruna do ziemi. Każde z tych wyłado-



Rys. 2. Schemat obwodu ziemia-atmosfera [ 1 ]



Rys. 3. Typy wyladowań atmosferycznych

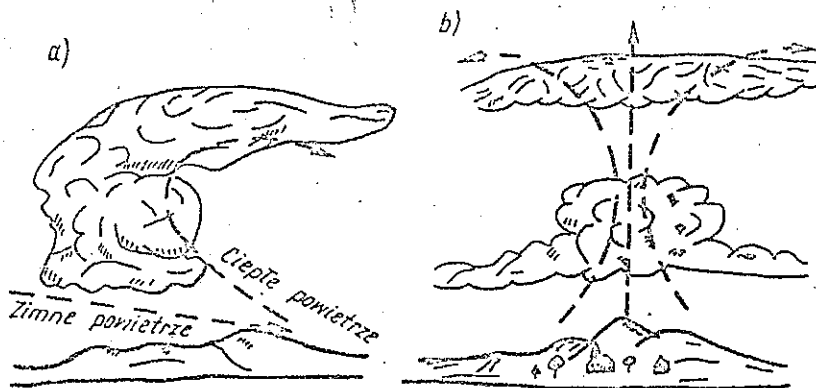
wał przenosi średnio ładunek ok. 20-30 C. Szacowania te są dość ostrożne, ponieważ dane z obszarów równikowych są skąpe, a właśnie burze na tych terenach są szczególnie aktywne elektrycznie. Zauważono dobową zmianę aktywności burzowej: jej największe nasilenie przypada na godz. 19 czasu GMT /Greenwich Mean Time/. Pokrywa się to ze zmianami gradientu potencjału elektrycznego w atmosferze przy dobrej pogodzie.

Rys. 2 przedstawia uproszczony schemat obwodu elektrycznego atmosfery. Natomiast na rys. 3 przedstawiono różne typy wyładowań atmosferycznych. Dla podtrzymania ładunku ujemnego ziemi, najistotniejsze z nich jest wyładowanie typu chmura-ziemia, przenoszące do ziemi ładunki ujemne. Częstość występowania tego rodzaju piorunów jest ponad 10-krotnie wyższa niż piorunów typu ziemia-chmura.

Burza elektryczna jest jednak zjawiskiem złożonym i nadal pozostaje obiektem badań eksperymentalnych i dociekań teoretycznych.

#### 2.4. Chmura burzowa [2], [4], [5]

Analizy meteorologiczne pokazują, że obłoki burzowe tworzą się przy spotkaniu i na granicy wielkich mas powietrza o różnych parametrach fizycznych /temperatura, wilgotność; rys. 4a/. Mamy wtedy do czynienia z tzw. burzą frontową. Obłoki bu-



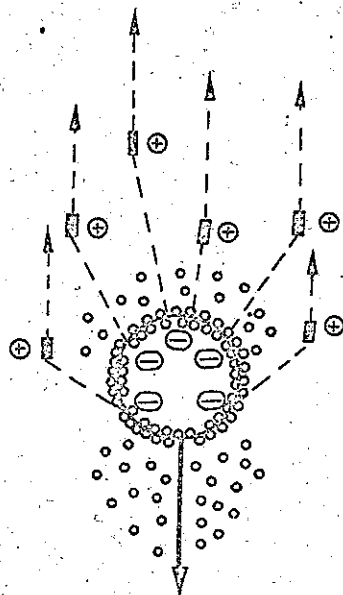
Rys. 4. Powstawanie chmury: a/ burzy frontowej, b/ burzy cieplnej [5]

rzowe tworzą się również nad obszarami, których topografia sprzyja przegrzewaniu się dolnych warstw powietrza /rys. 4b/. Powstaje wówczas tzw. burza cieplna. W obu przypadkach ciepłe i wilgotne powietrze wznosi się szybko do góry. Masy tego powietrza zawierają dużo pary wodnej i w miarę jak powietrze rozpręża się i ochładza, para wodna kondensuje i wydziela ciepło. Wilgotne powietrze w trakcie wznoszenia nie ochładza się więc tak szybko jak powietrze suche, dlatego też, ciepłe i wilgotne masy powietrza mogą osiągać duże wysokości, na których temperatura otoczenia jest niższa od  $0^{\circ}\text{C}$ . W trakcie procesu tworzenia się obłoku burzowego, górna część chmury zawierająca skondensowane krople wody wznosi się z prędkością dochodzącą do 90 km/godz. na wysokość 10 km i wyżej. Wskutek ochłodzenia, następuje przybywanie kryształków lodu w chmurze. Gdy nagromadzenie wody w stanie stałym i ciekłym stanie się tak duże, że prądy wstępujące powietrza nie będą mogły jej unieść, cząstki lodu zaczynają opadać, porywając za sobą powietrze i powodując powstanie prądów powietrznych zstępujących. W efekcie ocieplenia lodu na mniejszych wysokościach ze spodu chmury zaczyna padać deszcz. To stadium burzy, zwane fazą dojrzałości, charakteryzuje się również występowaniem wyładowań atmosferycznych. Po opadach i błyskawicach następuje rozproszenie obłoku.

## 2.5. Elektryzacja chmury [2], [4], [5]

W fazie dojrzałości chmury następuje w niej separacja ładunków elektrycznych. Proces ten, ze względu na trudności badań eksperymentalnych w naturalnych warunkach, tj. w łonie chmury, jest właściwie niewyjaśniony dostatecznie dobrze, chociaż jest on najważniejszy ze zjawisk odpowiedzialnych za wyładowania atmosferyczne. W większości teorii głównym mechanizmem elektryzacji jest separacja ładunków pomiędzy dużymi a małymi, naładowanymi różnoimiennie, cząsteczkami lodu jako następstwo różnicy w ich szybkościach opadania. Zdania badaczy różnicują się, jeżeli chodzi o sposób, w jaki cząsteczki lodu nabywają ładunek elektryczny. Teorie odwołują się do me-

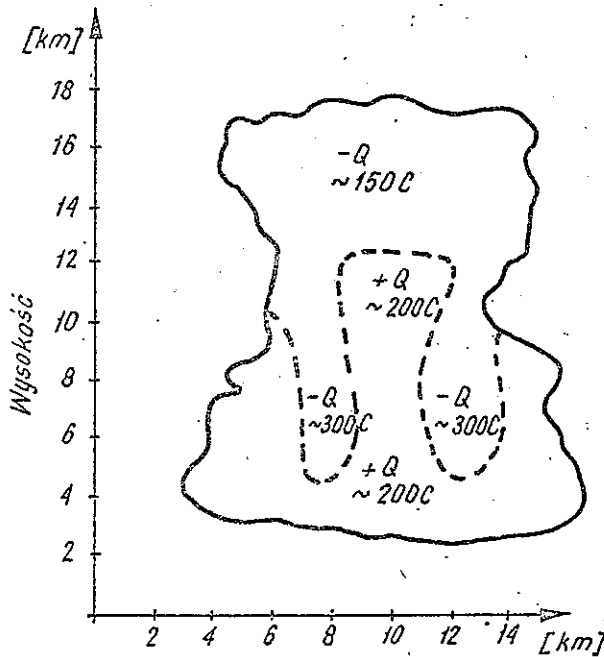
chanizmów ładowania się kropeł deszczu przy rozrywaniu ich przez prądy powietrza, selektywnego przyciągania ładunków przez krople spolaryzowane w polu elektrycznym, ładowaniu się wody przy parowaniu i kondensacji, ładowaniu się kryształów lodu przy ich krystalizacji lub zderzeniach.



Rys. 5. Proces elektryzacji krupy lodowej [5]

Rys. [5] przedstawia często wymieniane zjawisko, tłumaczące separację ładunków w obłoku [5]. Kropelki przechłodzonej wody przy zetknięciu z powierzchnią krupy lodowej zamarzają. W trakcie zamarzania krople pękają, przy czym zostają wyrzucone małe odpryski lodu naładowane dodatnio, a krupa lodowa zyskuje ładunek ujemny. Ten rozdział ładunków jest związany z różnicą temperatur w warstewce lodu na zamarzającej kropli przed wyrzuceniem odprysków. Początkowa koncentracja jonów dodatnich i ujemnych w lodzie jest większa tam, gdzie temperatura jest wyższa. Jony dodatnie  $H^+$  mają jednak większą szybkość dyfuzji niż jony  $OH^-$ , tak więc dzięki dyfuzji w części, cieplejszej przeważa ładunek ujemny. W zamarzającej kropli wody temperatura

niższa jest na zewnętrznych ścianach kropli. Przy pęknięciu kropli część zewnętrzna z ładunkiem "+" daje odpryski, część wewnętrzna z ładunkiem "-" zostaje jako warstwa na powierzchni kryły lodowej. Ciężkie kryły opadają do dolnych warstw chmury, która ma dzięki temu ładunek ujemny, lekkie odpryski pod wpływem wiatrów są unoszone w górne rejony obłoku i tworzą dodatnio naładowaną część chmury.



Rys. 6. Rozkład ładunków w obłoku burzowym w fazie dojrzałości [4]

Duża chmura może składać się z kilku oddzielnych komór burzowych, umieszczonych obok siebie. Typowa komora ma średnicę ok. 2 km i zawiera ładunek rzędu 1000 C w postaci mieszaniny ładunków ujemnych i dodatnich. Czas powstawania takiego ładunku jest rzędu 20 minut.

Rys. 6 przedstawia rozkład ładunków w chmurze w fazie dojrzałości [4]. Ładunki dodatnie znajdują się na wysokości 6-8 km,

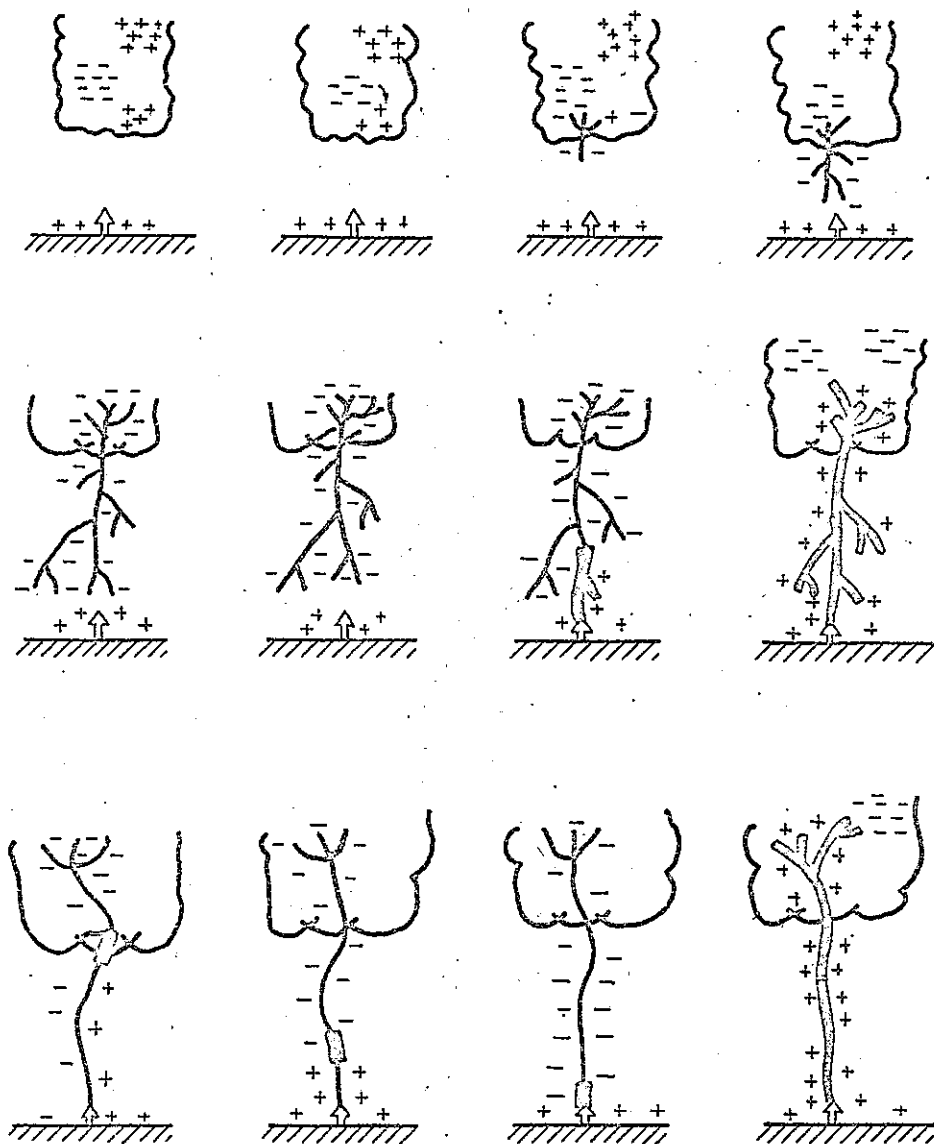
a ujemne na ok. 3-5 km. Wypadkowy ładunek na dnie chmury jest ujemny i wynosi ok. 50 C. W obecności obłoku burzowego potencjał Ziemi może być lokalnie wyższy od potencjału chmury. Różnica potencjałów może sięgać 100 MV.

## 2.6. Wyładowanie elektryczne [2], [3], [4], [5], [6], [12]

Wyładowania atmosferyczne rozpoczynają się po przekroczeniu pewnej krytycznej wartości natężenia pola pomiędzy obłokiem i ziemią - wartość ta wynosi ok. 10-15 kV/m.

Wyładowania piorunowe powstają po tym, jak część lub całość ładunku wewnątrz chmury ulegnie rozdzieleniu i utworzy przestrzenne centra dodatnie i ujemne. Już ładunek ok. 25 C wystarcza do utworzenia pioruna. Średni ładunek komory /1000 C/ wystarczy więc na ok. 40 piorunów. Po przekroczeniu wartości progowej /10-15 kV/m/ natężenia pola, wewnątrz chmury dochodzi do jednego lub kilku tzw. przedwyładowań pomiędzy centrami ładunków dodatnich i ujemnych /rys. 7a/. Wyładowania te nadają pęd strumieniowi ładunków ujemnych, który jonizując powietrze na swojej drodze, porusza się zgodnie z liniami sił pola elektrycznego w kierunku ziemi. Widoczny w postaci małego, jasnego punktu i zwrócony w kierunku ziemi początek tego wyładowania nosi nazwę główki wyładowania. Główka stanowi obszar silnej koncentracji ładunków, zdolny do jonizacji otoczenia. Wyładowanie to, zwane prekursorem lub liderem, ma najczęściej postać urywaną, schodkową: porusza się w kierunku ziemi skokami o długości ok. 50 metrów każdy /rys. 7b/. Prędkość ruchu prekursora wynosi ok. 5% prędkości światła, czas trwania jednego skoku 1-3 mikrosekundy, odstęp pomiędzy kolejnymi skokami ok. 50. mikrosekund. Część badaczy uzasadnia ów krokowy charakter pierwszego prekursora istnieniem wcześniejszego /niewidocznego na fotografiach/ wyładowania pilotującego. Wyładowanie to ma cechować się prądem kilku amperów i małą intensywnością świecenia. Według tej hipotezy, wyładowanie pilotujące porusza się znacznie wolniej /0,05% prędkości światła/ niż prekursor krokowy, jonizując powietrze na pewnym odcinku.





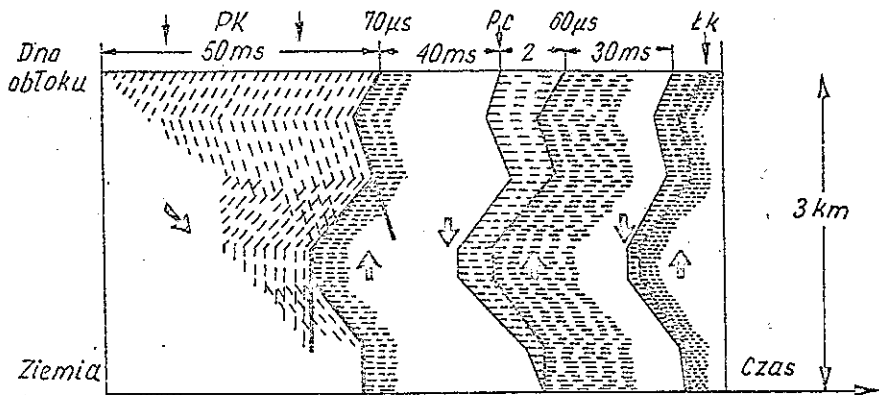
Rys. 7. Przebieg wyładowania

a/ rozwój prekursora krokowego, b/ powstanie łuku powrotu,  
c/ prekursor ciągły i II łuk powrotu [3].

i tworząc kanał, w którym rozpoczyna ruch prekursor. Ruch prekursora urywa się w chwili, gdy dogoni on główkę wyładowania pilotującego, natomiast wyładowania pilotujące rozwija się dalej, jonizując następny odcinek drogi, którą po chwili wykorzystywał prekursor do następnego skoku.

Fakt, że prekursor krokowy nie porusza się wzdłuż najkrótszej drogi w kierunku ziemi, a jego kanał jest z reguły silnie rozgałęziony, tłumaczy się tym, że główka prekursora krokowego /lub wyładowania pilotującego o ile przyjmie się jego istnienie/ wybiera do ruchu najbardziej zjonizowaną drogę, tj. drogę o największej przewodności - co odpowiada trasie, wzdłuż której chwilowa gęstość ładunków swobodnych jest możliwie duża. W czasie ruchu prekursora część ładunków z główki zostaje rozłożona wzdłuż kanału /kilka kulombów/. Przy zbliżaniu się do ziemi, ładunki zgromadzone w główce powodują wzrost lokalnego pola elektrycznego. Przy wartości rzędu 500 kV/m może z ziemi, w kierunku czoła prekursora, wybiegać tzw. wyznacznik połączenia /rys. 7b/. Dzieje się tak w tych miejscach, w których nierówności terenu zagęszczają linie sił pola i działają jak ostrze /efekt znany z elektrostatyki/. Mogą to być np.: dzwonnice, wysokie drzewa, słupy trakcji elektrycznej czy anteny telekomunikacyjne. W chwili kontaktu wyznacznika połączenia z prekursorem wzrasta gwałtownie prąd płynący przez kanał, a więc i jasność kanału. Ładunek z centrum ujemnego związanego kanałem prekursora z ziemią oraz ładunek rozłożony wzdłuż kanału uciekają szybko do ziemi, pozostawiając po sobie silnie zjonizowaną przestrzeń kanału. W literaturze nazywa się tę fazę wyładowania "uderzeniem powrotnym" lub "łukiem powrotu" /franc. "arc en retour"/. Zjawiska, jakie zachodzą w kanale wyładowania, nie są w pełni poznane ze względu na trudności eksperymentalne i pomiarowe. Po czasie ok. 40-70 milisekund - - po pierwszym łuku powrotu, przez jego kanał schodzi następny prekursor. tzw. typu ciągłego /rys. 7c/, załączając następny łuk powrotu w momencie zetknięcia z ziemią. Proces ten może się powtórzyć kilkunastokrotnie i trwać do 1 sekundy. Tak więc ciąg prekursorów i łuków powrotu tworzy błyskawicę. Szczyt

wyładowania usytuowany jest ok. 5 km nad poziomem Ziemi. Uderzenia wielokrotne powstają na skutek przyłączania przez wyładowania wewnątrz chmury nowych centrów ładunków ujemnych do początku kanału /rys. 7c/. Centra te mogą znajdować się obok lub nad pierwszym centrum ładunków.



Rys. 8. Przebieg wyładowania [4]

Pk - prekursor krokowy, Pc - prekursor ciągły, Łk - łuk powrotu

Rys. 8 przedstawia przebieg czasowy wyładowania atmosferycznego składającego się z trzech łuków powrotu. W pobliżu bardzo wysokich budynków lub wież przebieg wyładowania może być inny. Prekursor wychodzi wtedy z ziemi /budynku, wieży/. Po dojściu do chmury powstaje wyładowanie długotrwałe, charakteryzujące się małym prądem i długim czasem jego płynięcia. Po zniknięciu wyładowania długotrwałego może nastąpić zwykłe wyładowanie główne, poprzedzone prekursorem ciągłym wychodzącym z chmury.

### 3. PIORUN

#### 3.1. Nowe metody badania wyładowań piorunowych

[4], [3], [10]

Badania pioruna są trudne, ponieważ naturalne uderzenie pioruna w ściśle określony punkt, wokół którego ustawione są

urządzenia pomiarowe, jest bardzo mało prawdopodobne. Dlatego też powstały, jak dotąd w trzech krajach /Francja, USA i Japonia/, stacje tzw. sztucznego wywoływania lub prowokowania piorunów. Stacje takie są budowane w miejscach, w których prawdopodobieństwo wystąpienia naturalnych zjawisk burzowych jest duże. Podczas sezonu burzowego /w Europie: czerwiec-lipiec/ stacja eksperymentalna działa bezustannie. Bliskość lub formowanie się obłoku burzowego jest anonsowane przez radar meteorologiczny, licznik wyładowań atmosferycznych i elektrometr. Elektrometr załącza alarm akustyczny z chwilą, gdy pole na Ziemi przekroczy 0,5 kV/m polaryzacji ujemnej. W momencie gdy pole osiąga wartość 6-10 kV/m, stacja gotowa jest do spowodowania wyładowania. Dokonuje się tego za pomocą rakiety. Stanowisko odpalania rakiety znajduje się na szczycie masztu o wysokości 25 metrów. Rakieta po wystrzeleniu, ciągnie za sobą cienki, stalowy drut o średnicy 0,2 mm i rezystancji ok. 7 omów/metr, wychodzący z rozwijacza /szpuli/, zainstalowanego na maszcie. Szybkość wznoszenia się rakiety osiąga ok. 260 m/s. W ciągu 5 sekund po odpaleniu rakieta znajdzie się na tzw. wysokości wywołania, rzędu 1200 metrów. Przez drut przechodzi wówczas prąd kilku amperów, wywołany przez prekursor wstępujący, wychodzący z czoła rakiety w stronę chmury. Prąd ten przegrzewa drut i w kilkanaście milisekund później drut pęka u podstawy, wywołując łuk o prądzie kilkudziesięciu amperów, spalający drut stalowy. Tworzy się dość jasnoświecący kanał pary metalicznej o wysokiej temperaturze. Po kilkunastu-kilkudziesięciu milisekundach obserwuje się wyładowania w łonie obłoku, a następnie, wykorzystując kanał pary metalicznej, schodzi z chmury szybki /o prędkości  $10^6$  m/s/ prekursor, który w momencie osiągnięcia dna kanału powoduje powstanie "łuku powrotu". Obszar uderzenia jest wyznaczony przez wierzchołek masztu. W wyładowaniach prowokowanych sztucznie nie występuje więc tzw. prekursor krokowy.

Istotną różnicą pomiędzy piorunami naturalnymi a prowokowanymi jest różnica czasów narastania impulsów prądu tych wyładowań. Wyładowania sztuczne są procesami szybszymi /średni czas narastania: ok. 0,5 mikrosekund przy czasie narastania im-

pulsów prądu pioruna naturalnego rzędu 2-4 mikrosekundy/. Pozostałe parametry obu rodzajów wyładowań sztucznego i naturalnego, takie jak: wartość prądu szczytowego, ładunek przenoszony przez wyładowanie, ilość łuków powrotu w jednej błyskawicy, wartości szczytowe pól elektromagnetycznych emitowanych w trakcie wyładowania, są zbliżone.

W trakcie pomiarów i badań są używane następujące eksperymentalne środki: urządzenia analizy pola elektrostatycznego na ziemi i wewnątrz chmury /balony-sondy/, środki analizy fotograficznej /szybkie kamery: 500-1000 obrzów na sekundę/, mierniki bezpośrednio: prądów pioruna, natężeń pól elektromagnetycznych promieniowanych w czasie wyładowania, ciśnienia akustycznego i strumienia jasności /luminancji/ błyskawicy. Obok analizy wyładowań wykonuje się pomiary przepięć indukowanych w liniach, kablach podziemnych i powietrznych, urządzeniach elektronicznych, bada się też skuteczność różnych metod uziemienia i ekranowania.

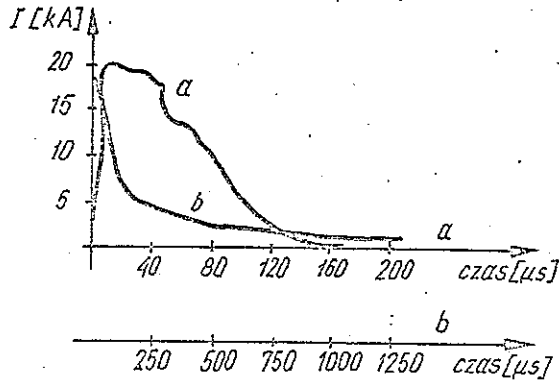
### 3.2. Wyniki badań [4], [5], [6], [12]

Prądy płynące w trakcie wyładowania są impulsami o bardzo krótkim czasie narastania: wg [5] czas ten wynosi kilka mikrosekund, według [4] kilkaset nanosekund.

Rys. 9 przedstawia przebieg prądów pioruna, który zazwyczaj aproksymuje się [6] wzorem:

$$i(t) = A \exp(-\alpha t) - B \exp(-\beta t) + C \exp(-\gamma t) \quad (1)$$

Występujące tu współczynniki, dla każdego indywidualnego wyładowania mają na ogół różne wartości. Najczęściej przyjmuje się  $A \approx 20$  kA,  $B \approx 25$  kA,  $C \approx 25$  kA,  $\alpha = 5 \times 10^4$  1/s,  $\beta \approx 5 \times 10^5$  1/s,  $\gamma \approx 7 \times 10^2$  1/s, zaś wartość szczytowa prądu pioruna jest wtedy równa  $i_{\text{szczyt}} = 20$  kA. Pierwszy łuk powrotu jest z reguły najbardziej intensywny i wynosi średnio 30 kA w szczycie, następne wyładowania mają wartość szczytową mniejszą, rzędu 12 kA. Czasy narastania impulsu prądu pierwszego łuku wynoszą ok. 3-5 mikrosekund, następnych ok. 1 mikrosekundy [4].



Rys. 9. Typowy kształt impulsu  
a/ krótkotrwałego, b/ długotrwałego prądu pioruna [5] [6]

Krzywa 2 z rys. 9 przedstawia wyładowanie długotrwałe. Po maksimum prądu pioruna płynie stosunkowo mały prąd rzędu kilku do kilkuset amperów przez czas rzędu milisekund. Ładunek przenoszony przez prądy długotrwałe może być większy niż ładunek przenoszony przez krótkotrwałe prądy o dużych amplitudach. Wyładowania długotrwałe powodują zniszczenia cieplne odgromników i pożary, a pioruny krótkotrwałe są przyczyną uszkodzeń dynamicznych, np. rozszczipiania drzew. Wartość ładunku przeniesionego przez wyładowanie rzadko przekracza 100 C, a w 50% przypadków jest większa od 25 C.

Tablica 1 przedstawia wyniki badań parametrów ok. 50 piorunów, dokonane w stacji badawczej St'Privat d'Alliers usytuowanej w górzystym rejonie Masywu Centralnego we Francji [4]. Czasy narastania impulsów prądu wyładowań tam mierzonych mogą różnić się od czasów narastania prądów wyładowań naturalnych, ponieważ pioruny obserwowane i mierzone w St'Privat d'Alliers były wywoływane sztucznie. Pozostałe parametry podane w tablicy 1 są charakterystyczne również dla błyskawic powstających w sposób naturalny.

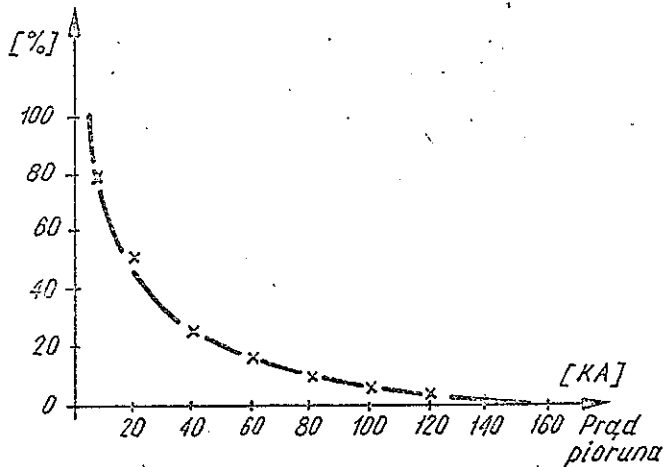
Częstość występowania w warunkach nizinnych różnych wartości prądu szczytowego pioruna przedstawia rys. 10 [5]. Jest to tzw. częstość kumulatywna, która określa procent przypad-

ków, dla których prąd pioruna przekracza daną wartość, określoną przez odciętą wykresu. Tak np. prąd przekraczający 50 kA wartości szczytowej występuje w ok. 17% przypadków wyładowania atmosferycznego.

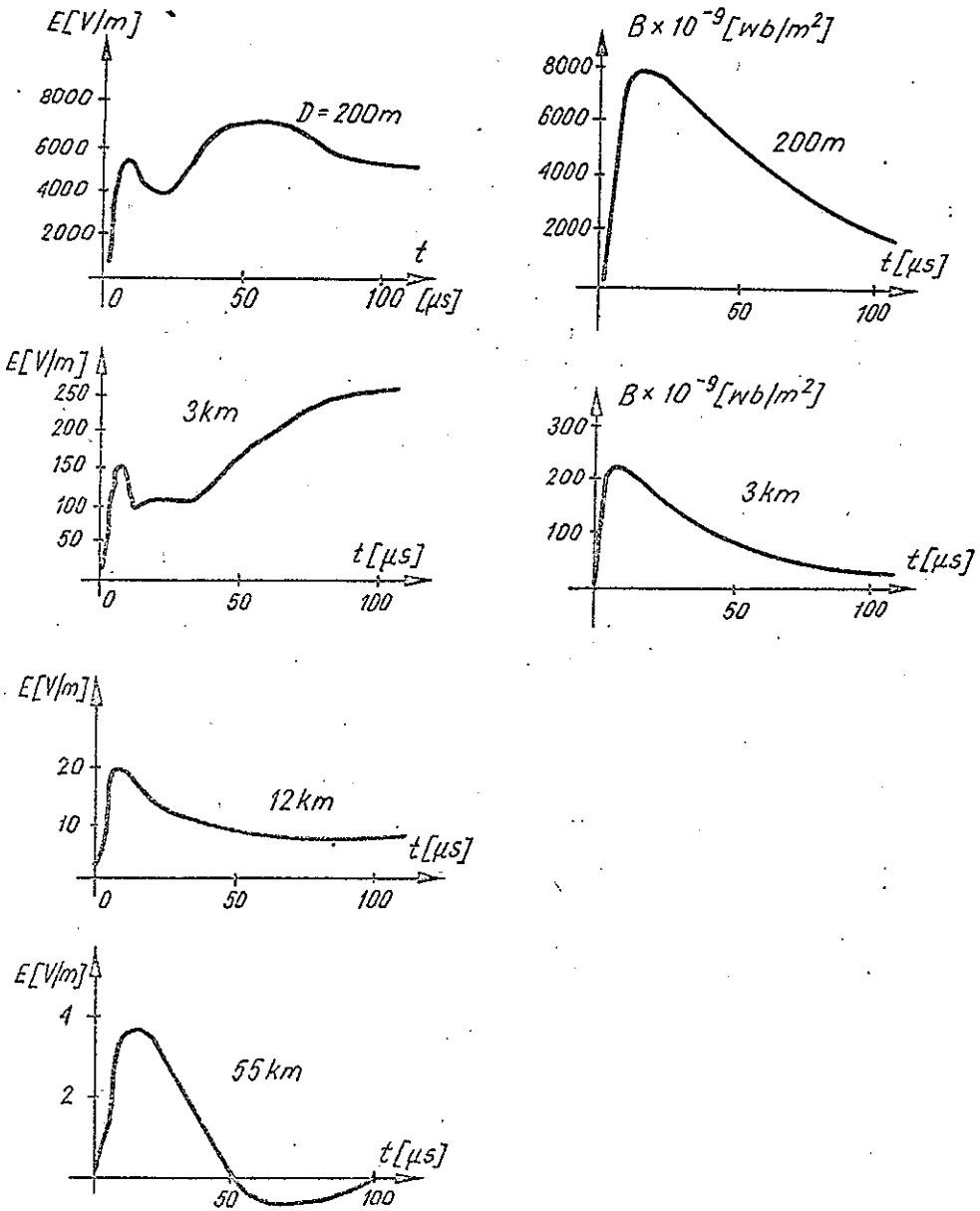
Tablica 1

Wartości charakterystyczne 47 wyładowań zarejestrowanych przez stację St'Privat d'Alliers [11]

Parametr	Procent wyładowań o parametrach przekraczających podane wartości			
	90%	50%	10%	Max
Amplituda [kA]	2,5	12	21	58
Czas narastania [ $\mu$ s]	0,1	0,3	1	
Ładunek idt [C]	7	30	120	140
Liczba łuków powrotu w 1 błyskawicy	4	11	15	53
Czas trwania [ms]	250	420	940	1070



Rys. 10. Kumulatywna częstość występowania wartości szczytowych prądów pioruna [5]



Rys. 11. Typowe formy impulsów pola elektrycznego i magnetycznego dla różnych odległości od miejsca wyładowania. Prąd wyładowania - 10 kA [9]

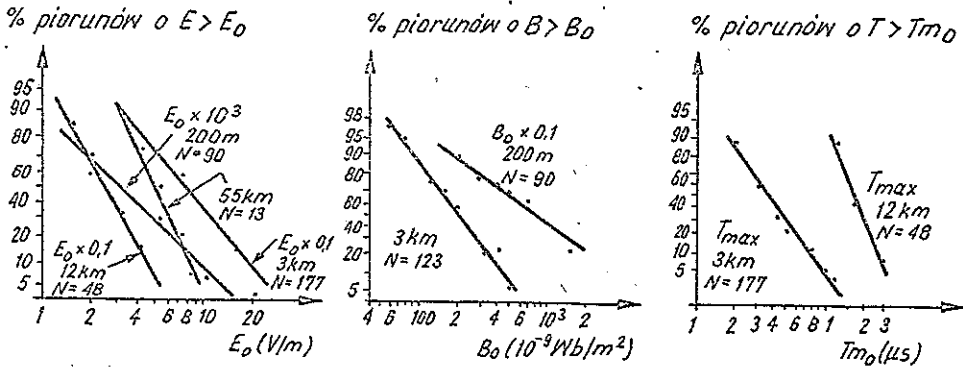


### 3.3. Oddziaływanie pioruna na odległość

[3], [5], [6], [9], [11], [14]

Piorun jest zjawiskiem groźnym dla urządzeń i systemów trafionych bezpośrednio, ale nie jest to jedyne zagrożenie, jakie niesie wyładowanie. W czasie wyładowania atmosferycznego emitowane jest silne pole elektromagnetyczne. Promieniowanie to ma istotny wpływ na pracę urządzeń znajdujących się w polu bliskim uderzenia pioruna w ziemię i może zakłócać pracę systemów odległych od miejsca wyładowania.

Rys. 11 przedstawia typowe kształty impulsów pola magnetycznego i elektrycznego w funkcji odległości od miejsca wyładowania, dla prądu wyładowania  $I_0 = 10$  kA, a rys. 12 kumulatywną częstość występowania różnych amplitud i czasów narastania pola elektromagnetycznego dla różnych odległości od pioruna [9].



Rys. 12. Kumulatywna częstość występowania różnych amplitud i czasów narastania dla różnych odległości od pioruna [9]

N - liczba zarejestrowanych uderzeń pioruna, E - natężenie pola elektrycznego, B - indukcja magnetyczna, T - czas narastania impulsu elektromagnetycznego pioruna

Warunki propagacji /ukształtowanie terenu, pora dnia, pora roku, pogoda/ mają istotne znaczenie dla pola elektromagnetycznego emitowanego przez piorun. Wraz ze wzrostem odległości od miejsca wyładowania amplituda pola maleje. Pomiary były wykonywane za pomocą mierników pola elektrycznego i magnetycznego o

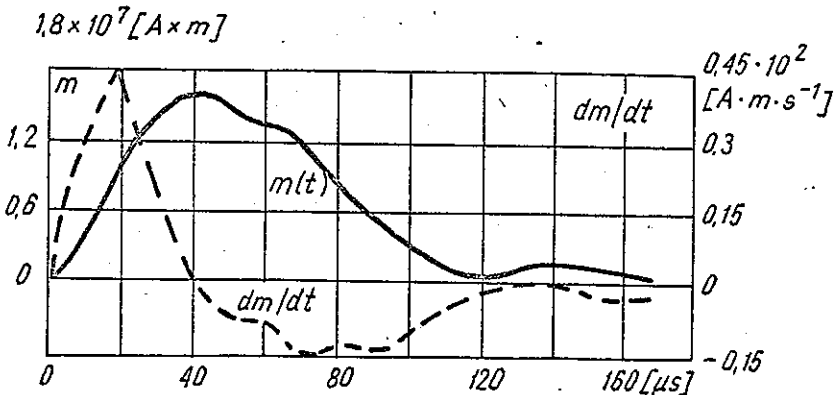
przenoszonym pasmie częstotliwości 500 kHz - 6 MHz i 150 kHz - 20 MHz. Rys. 11 przedstawia więc pole elektromagnetyczne mierzone metodą tzw. szerokiego pasma i nie daje informacji o rozkładzie energii promieniowania w funkcji częstotliwości.

Równolegle z badaniami eksperymentalnymi szuka się modeli teoretycznych [6],[5],[9],[13] zjawiska promieniowania elektromagnetycznego w czasie wyładowania atmosferycznego. Modele takie pozwalają, np. oszacować przepięcie indukowane w liniach telekomunikacyjnych, energetycznych lub innego typu urządzeniach. Najczęściej, modele te traktują kanał wyładowania jak antenę nadawczą, przez którą przepływa impuls prądu z ziemi do chmury. Wysokość owej anteny jest zmienna w czasie zgodnie ze wzorem [6]:

$$h(t) = c/ab [(a-b) - b \exp(-at) - a \exp(-bt)], \quad /2/$$

gdzie:  $c=3 \times 10^8$  m/s,  $a=6 \times 10^4$  1/s,  $b=7 \times 10^5$  1/ms.

Również prąd płynący przez kanał wyładowania jest funkcją czasu /wzór /1/ z pkt. 3.2/. Antena o wysokości  $h(t)$  określonej wzorem /2/ zasilana prądem  $i(t)$  wyrażonym wzorem /1/ wy-



Rys. 13. Zależność momentu elektrycznego  $m(t)$  i jego pochodnej  $dm(t)/dt$  od czasu [6]

tworza w odległości  $r$  pola: elektryczne  $E(r)$  i magnetyczne  $H(r)$ , których składowe wynoszą [6]:

$$E_x = E_y = 0$$

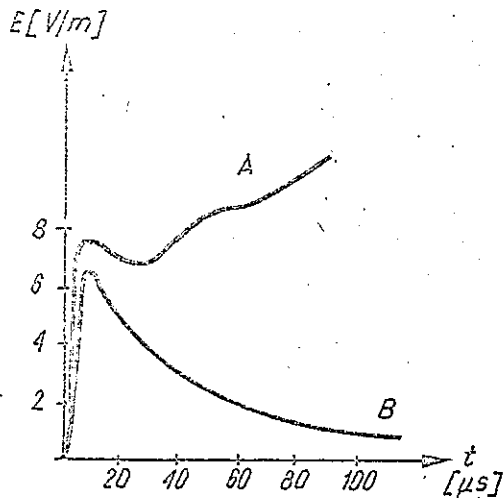
$$E_z \cong (-1/2\pi\epsilon_0) \left[ (1/r^3) \int m(t') dt' + (1/cr^2)m(t') + (1/c^2r)dm(t')/dt \right] \quad /3/$$

$$H_y = H_z = 0$$

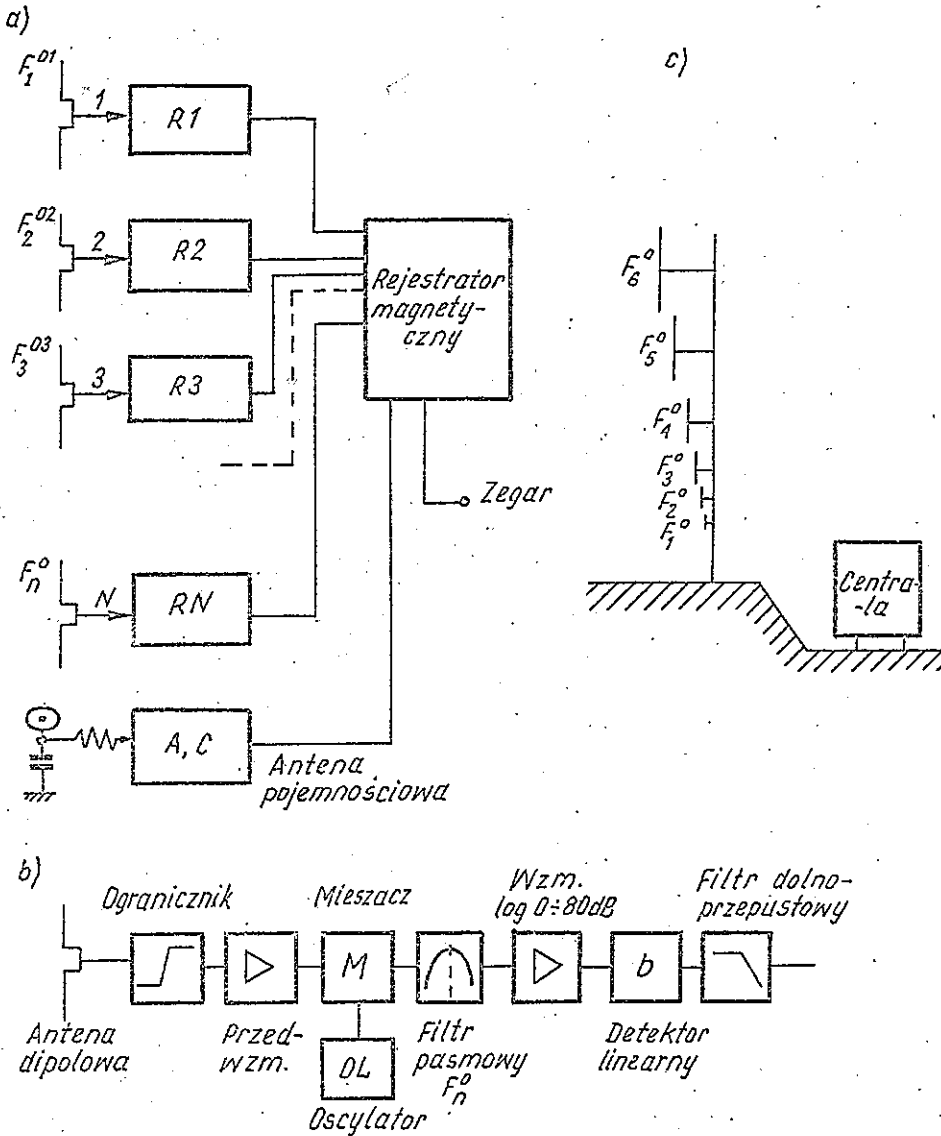
$$H_x \cong (1/2\pi) \cdot \left[ (1/r^2)m(\dot{t}') + (1/cr)dm(t')/dt \right]$$

gdzie:  $\epsilon_0$  - przenikalność dielektryczna próżni,  $c$  - prędkość światła,  $t' = t - (r/c)$ , oraz  $m(t) = h(t)$  i  $(\dot{t})$  - moment elektryczny równy iloczynowi wartości chwilowych wysokości kanału i prądu w kanale.

Zmiany tego momentu w czasie ilustrują krzywe podane na



Rys. 14. Natężenia pola  $E_z$  obliczone teoretycznie dla wyładowania o prądzie maksymalnym  $I_0 = 4$  kA i odległości: A/ 8 km, B/ 17,5 km [5]



Rys. 15. Pomiar charakterystyki spektralnej promieniowania elektromagnetycznego pioruna

a/ schemat ogólny, b/ schemat pojedynczego toru pomiarowego, c/ usytuowanie anten na maszcie [3]

rys. 13. Człony równania /3/ proporcjonalne do  $r^{-3}$ ,  $r^{-2}$ ,  $r^{-1}$  interpretuje się jako pola elektrostatyczne, indukcji i promieniowania. Każdy z tych członów dominuje w innej odległości od kanału wyładowania, co tłumaczy zmiany kształtu impulsu pola elektromagnetycznego w funkcji odległości.

Rys. 14 przedstawia przebieg natężenia pola elektrycznego, obliczony teoretycznie dla prądu wyładowania  $I=4$  kA i odległości 8 i 17,5 km [5].

### 3.4. Analiza widmowa [3], [8]

Rys. 15 przedstawia sposób pomiaru amplitud składowych widma częstotliwości promieniowania elektromagnetycznego wyładowania atmosferycznego. N-dipoli jest połączonych z N-odbiornikami o przenoszonym pasmie częstotliwości B, dostrojonych do częstotliwości  $F_1, F_2 \dots F_N$ . Dipole są rozmieszczone tak, by pokryć składową pionową pola elektromagnetycznego.

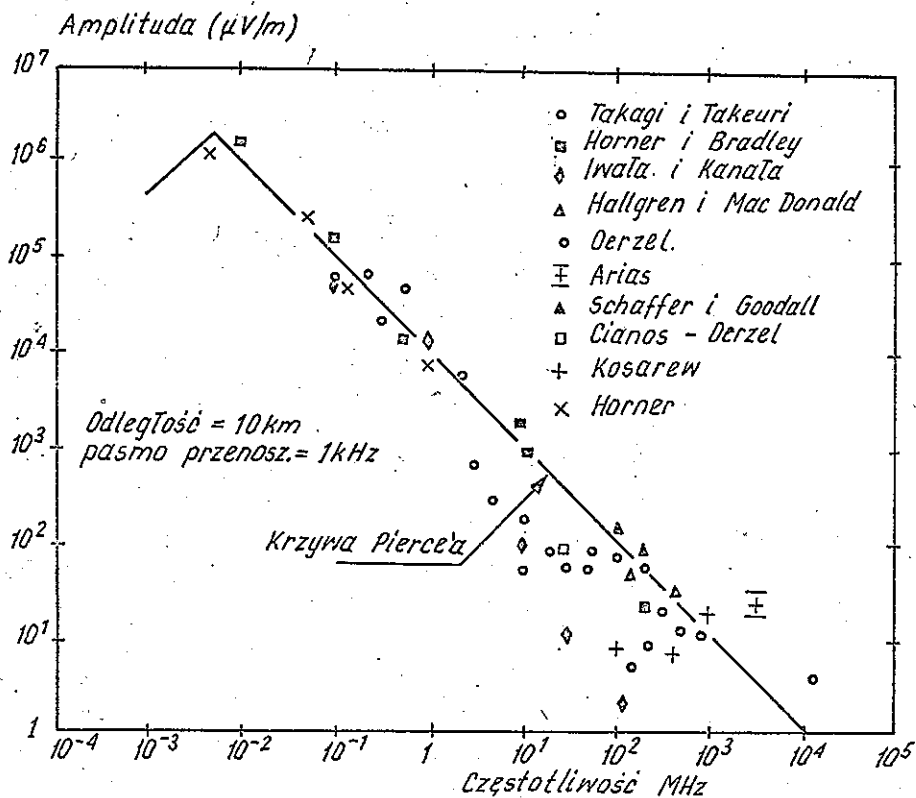
Rys. 16 podaje wyniki takiej analizy unormowane, tj. sprowadzone do tzw. krzywej Pierce'a - dla której pasmo częstotliwości przenoszone przez odbiornik jest równe 1 kHz, a odległość od punktu wyładowania równa 10 km. Dzięki tego rodzaju normalizacji przenoszonego pasma częstotliwości i odległości można z krzywej Pierce'a odczytać prawdopodobne średnie wartości amplitudy pola elektromagnetycznego dla dowolnej odległości i dowolnego pasma częstotliwości przenoszonego przez odbiornik. Przyjmuje się przy tym, że amplituda mierzonego pola elektromagnetycznego jest odwrotnie proporcjonalna do odległości od pioruna:

$$e_p \propto 1/l$$

a amplituda sygnału na wyjściu odbiornika jest proporcjonalna do szerokości pasma częstotliwości /dla częstotliwości mniejszych od 100 kHz/ lub do pierwiastka z szerokości pasma częstotliwości /dla częstotliwości większych od 100 kHz/:

$$e_{p1}/e_{p2} \propto B_1/B_2 \quad \text{dla } f_0 < 100 \text{ kHz}$$

$$e_{p1}/e_{p2} \propto \sqrt{B_1/B_2} \quad \text{dla } f_0 > 100 \text{ kHz}$$

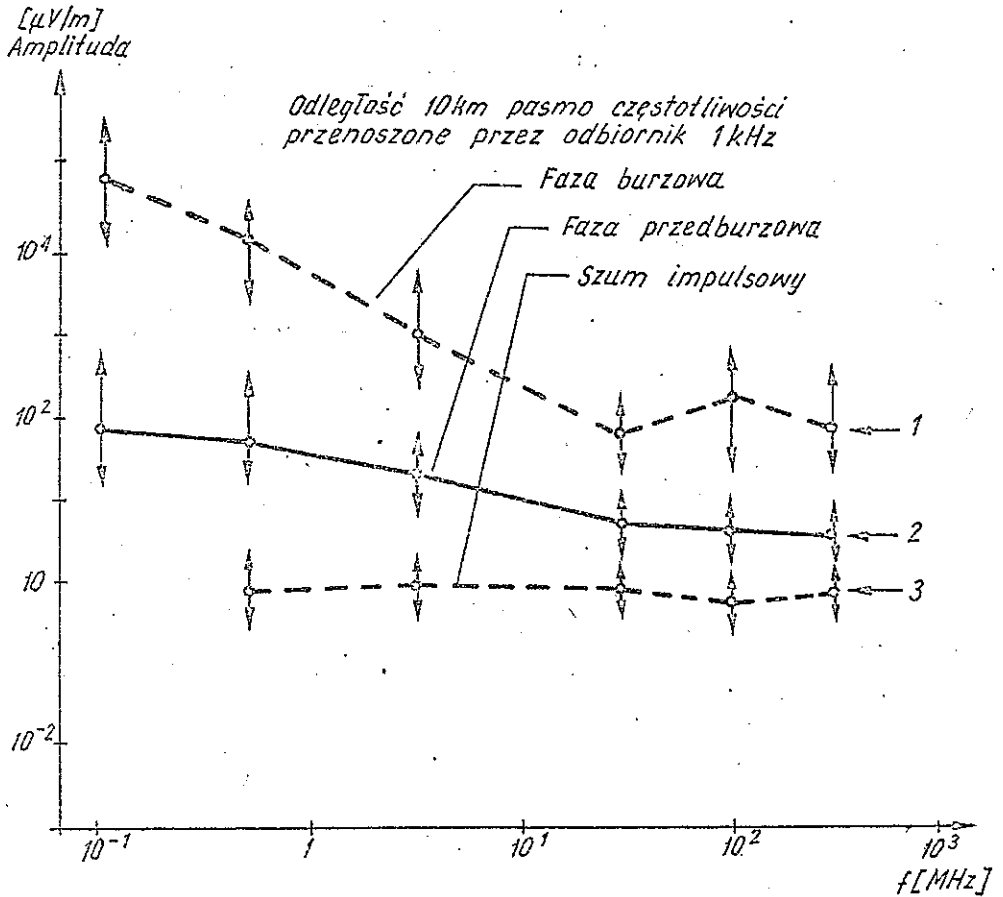


Rys. 16. Amplitudy widma częstotliwości składowych pola elektromagnetycznego pioruna w odległości 10 km od wyładowania dla przenieszonego pasma częstotliwości 1 kHz [3]

Pomiary pozwalają także obserwować zmiany pola elektromagnetycznego różnych faz burzy. Okazuje się bowiem, że pole elektromagnetyczne jest promieniowane również przed pojawieniem się pioruna. Odpowiedzialne za to są wspomniane wcześniej zjawiska elektryzacji w łonie obłoku, wyładowania częściowe przed

powstaniem prekursora krokowego a także sam ten prekursor.

Rys. 17 przedstawia zmiany amplitudy natężenia pola elektromagnetycznego wraz z częstotliwością i fazą rozwoju burzy. Przejście od etapu powstania obłoku do etapu dojrzałości wyraża się przez stopniowe przechodzenie od krzywej 2 /rys. 17/ ,



Rys. 17. Zmiany amplitudy pola elektromagnetycznego wyładowania atmosferycznego wraz z częstotliwością i fazą rozwoju burzy [3]

opisującej promieniowanie elektromagnetyczne przed wyładowaniem piorunowym, do krzywej 1 reprezentującej amplitudy widma składowych częstotliwości pola pioruna. Krzywa 3 opisuje promieniowanie impulsów podobne do ciągłego szumu, którego charakterystyka pozostaje stała w szerokim zakresie częstotliwości i jest niezależna od faz rozwoju burzy. Należy zauważyć, że faza przedburzowa odróżnia się od fazy burzowej nie tylko mniejszymi amplitudami sygnałów promieniowanych, ale również mniejszą zależnością amplitudy sygnałów od częstotliwości.

### 3.5. Stopień bezpośredniego zagrożenia

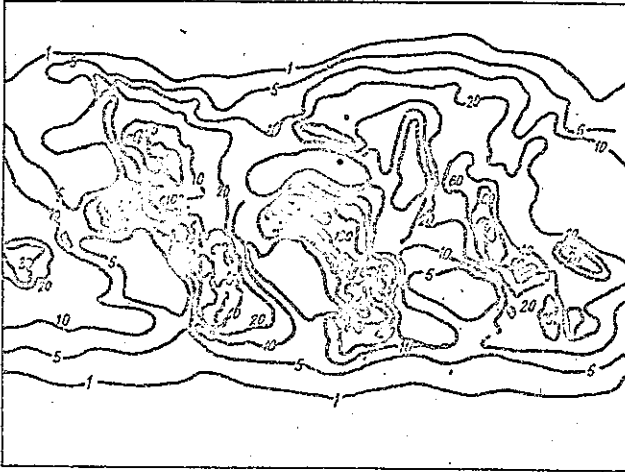
/Prawdopodobieństwo uderzenia pioruna/ [5], [6], [11], [10]

Efektom impulsu elektromagnetycznego jest indukowanie prądów lub napięć we wszystkich przewodnikach i strukturach przewodzących poddanych działaniu pola elektromagnetycznego. Prądy indukowane przez pola w przewodnikach, kablach, liniach telekomunikacyjnych rzadko są groźne dla samego przewodnika, kabla czy linii. Częściej są zagrożone systemy elektroniczne i elektryczne dołączone do linii, np. w przypadku zasilającej linii energetycznej większość urządzeń powszechnego a także profesjonalnego użytku. Ocenia się, że zjawiska burzowe zachodzą równocześnie na ok. 0,2% powierzchni ziemi. Każda z ok. 1500 burz obejmuje obszar rzędu 20-200 km<sup>2</sup> i posuwa się z prędkością ok. 30-50 km/godz. Prosty sposób opisu aktywności burzowej w danym rejonie jest podanie tzw. liczby dni burzowych. Dzień uważa się za burzowy, jeśli w zasięgu punktu obserwacyjnego /~20 km/ zarejestrowano w tym dniu co najmniej jeden piorun.

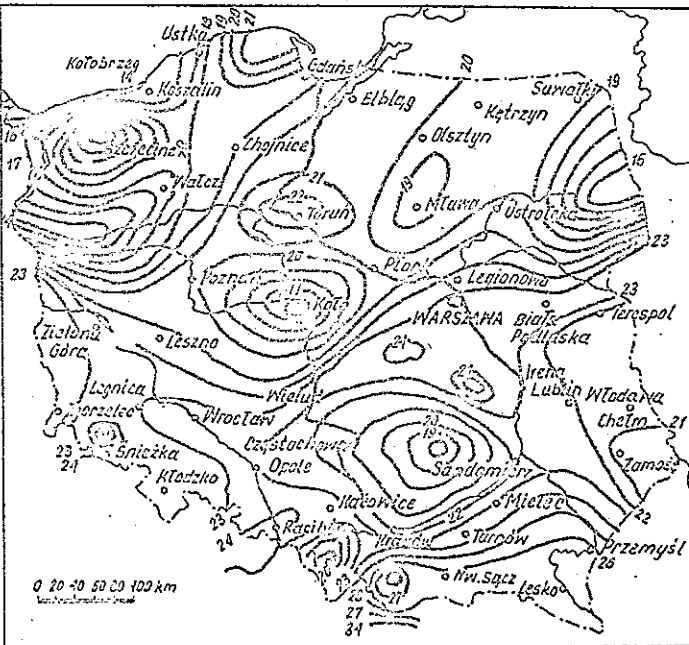
Rys. 18a i b przedstawia mapy, tzw. poziomów izokeraunicznych, podające liczbę dni burzowych dla obszaru kuli ziemskiej oraz dla Polski. Aktywność burzowa różnych rejonów geograficznych jest niejednakowa. W obszarach położonych powyżej 82°N i 60°S, a także w obszarach pustynnych, burz z wyładowaniami



a)



b)



Rys. 18. Średnia liczba dni burzowych w ciągu roku  
a/ dla kuli ziemskiej, b/ dla Polski [1] [5]

elektrycznymi nie obserwuje się. Rejony, dla których liczba dni burzowych w roku jest większa niż 100 nazywa się światowymi ośrodkami burzowymi. Ośrodki takie występują w Afryce /15°E, 10°N/, Ameryce Południowej /50°W, 10°S/ oraz w Azji Południowo-Wschodniej /110°E, 10°N i 90°E, 10°N/. Liczba dni burzowych w roku jest jednak wskaźnikiem zbyt mało dokładnym ze względu na małą gęstość sieci obserwatoriów meteorologicznych. Bardziej precyzyjną charakterystykę zjawisk burzowych stanowi liczba wyładowań przypadająca na określoną powierzchnię w ciągu określonego czasu. W Polsce liczba uderzeń pioruna obliczona na 1 dzień burzowy i 1 km<sup>2</sup> powierzchni waha się w granicach 0,1-0,2, zależnie od miejscowych warunków [5].

Wg danych radzieckich [5], przestrzeń w której linia energetyczna długości L zbiera wyładowania wynosi ok.  $L \times 10$  h, gdzie h jest średnią wysokością linii w metrach. /Podobna zależność powinna obowiązywać także dla innych linii, np. telekomunikacyjnych/. Można stąd znaleźć liczbę uderzeń pioruna na całej długości linii w ciągu roku. Znając prąd pioruna, jaki wytrzymuje linia bez uszkodzeń, oraz znając prawdopodobieństwo wystąpienia wyładowania o określonej wartości szczytowej /rys. 10/ można określić liczbę wyładowań zagrażających linii. Np. dla linii o długości 100 km i wysokości zawieszenia 12 metrów powierzchnia "zbierania" wyładowań wynosi:

$$100 \times 10 \times 0.012 = 12 \text{ km}^2;$$

liczba uderzeń w ciągu jednego dnia burzowego przy założeniu średniej liczby uderzeń pioruna na danym obszarze równej 0,11:

$$0,11 \times 12 = 1,32;$$

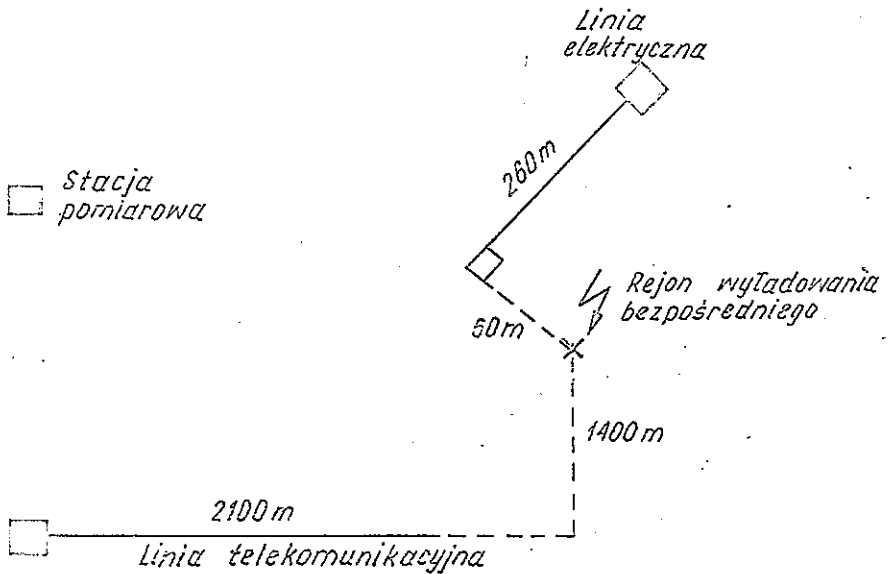
liczba uderzeń przy 30 dniach burzowych w ciągu roku:

$$1,32 \times 30 = 39,6 \text{ /rok.}$$

Jeżeli prąd pioruna, który ma wytrzymać linia, wynosi 100 kA, prawdopodobieństwo wystąpienia piorunów o prądzie większym od 100 kA jest równe ok. 5% /rys. 10/, prawdopodobna liczba wyładowań tego rodzaju na izolacji linii wyniesie:

$$39,6 \times 0,05 = 2/\text{rok}.$$

Uwzględniając pioruny o prądach nie zagrażających bezpośrednio linii, ale zakłócających pracę urządzeń z nią związanych oraz wyładowania uderzające w pewnych odległościach od linii i również zakłócające jej pracę prawdopodobieństwo wystąpienia nieprawidłowości w pracy linii znacznie wzrasta.



Rys. 19. Pomiar przepięć i prądów w liniach telekomunikacyjnych i elektrycznych w St'Privat d'Alliers [10]

W stacji badania wyładowań St'Privat d'Alliers /Francja/ przeprowadzono pomiary przepięć i prądów powodowanych przez uderzenia pioruna w liniach telekomunikacyjnych i energetycznych [10]. Rys. 19 przedstawia usytuowanie badanych linii w stosunku do miejsca wyładowania. Linia telekomunikacyjna ma długość 2100 metrów i jej impedancja charakterystyczna wynosi 860 omów, zaś linia energetyczna długości 160 metrów ma impedancję 650 omów. Dla prądu pioruna znormalizowanego /10 kA/

napięcia wyindukowane w linii telekomunikacyjnej dwuprzewodowej wynoszą:

$$0,68 \text{ kV} < V < 0,82 \text{ kV}$$

prąd więc  $/Z_0 = 860 \text{ omów}/$ :

$$1,05 \text{ A} < I < 1,1 \text{ A}$$

Średni czas narastania impulsu prądu /napięcia/ jest równy ok. 0,4 mikrosek., a czas trwania tego impulsu ok. 10 mikrosekund.

Dla linii telekomunikacyjnej wieloprzewodowej o impedancji charakterystycznej 500 omów, przepięcie jest rzędu 200 woltów, a prąd wyindukowany ok. 0,4 A. Czas narastania impulsu napięcia /prądu/ wynosi ok. 1,1 mikrosekundy.

Dla linii energetycznej, w tych samych warunkach wyładowania przepięcie jest rzędu 70 kV, prąd płynący ok. 86 A. Czas narastania równy 1,2 mikrosekundy. Są to wielkości, z którymi należy się liczyć już na etapie projektowania sprzętu elektronicznego dla potrzeb telekomunikacji.

#### 4. SYMULACJA

##### 4.1. Wrażliwość urządzeń [11]

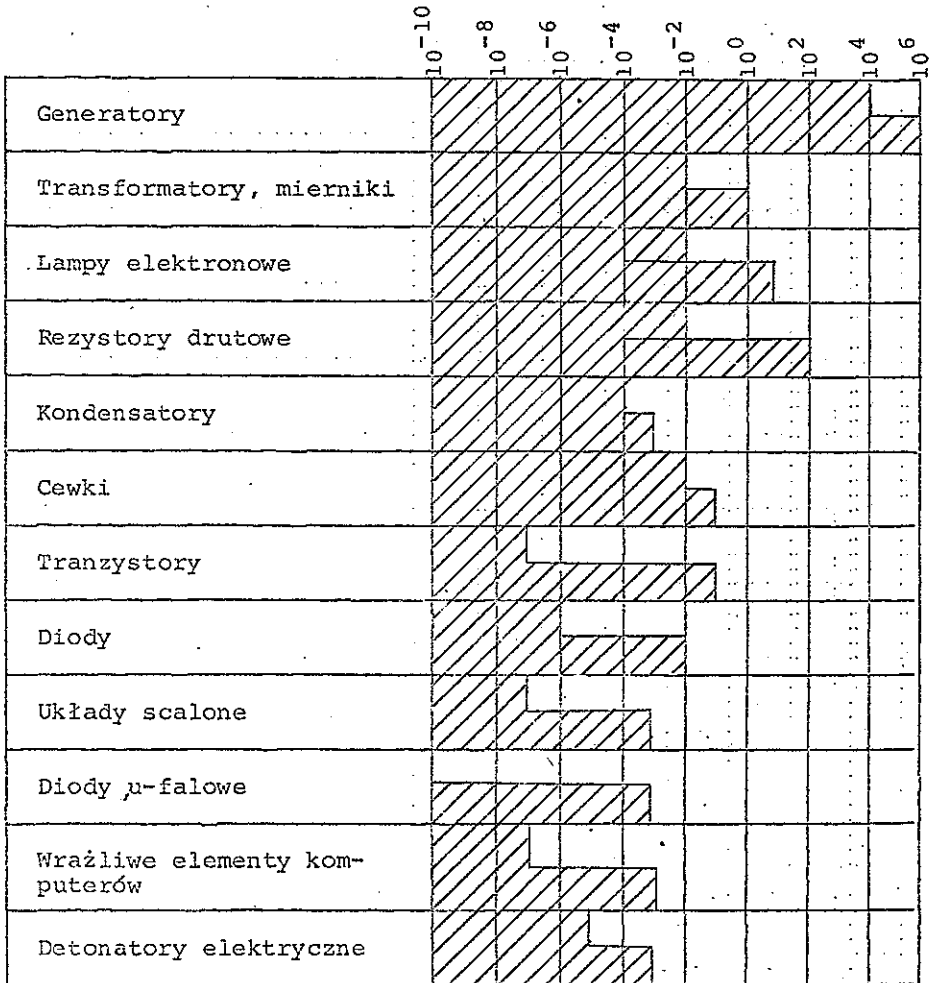
Kompatybilność elektromagnetyczną określa wrażliwość elementów i urządzeń miarą energii, która jest potrzebna, aby trwale uszkodzić dany element lub zakłócić jego działanie. Tablica 2 przedstawia wrażliwości podstawowych elementów układów elektronicznych. Najmniejszą odpornością charakteryzują się elementy półprzewodnikowe, a więc najistotniejsze składniki obwodów elektronicznych.




##### 4.2. Symulatory [7], [11], [16]

Z uwagi na losowy charakter zjawiska i koszty nie jest możliwe tworzenie wielu stacji do badania skutków zjawisk burzo-

Tablica 2

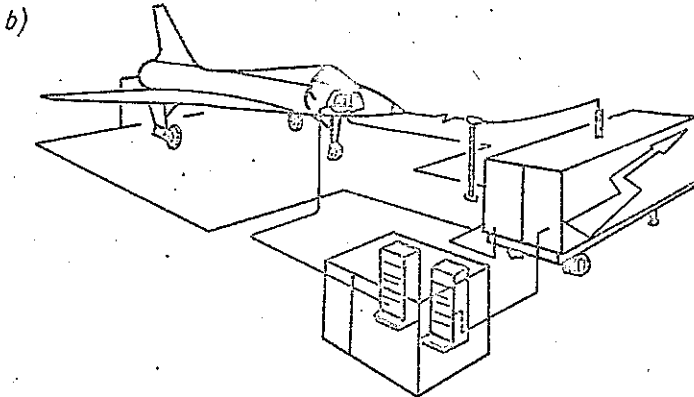
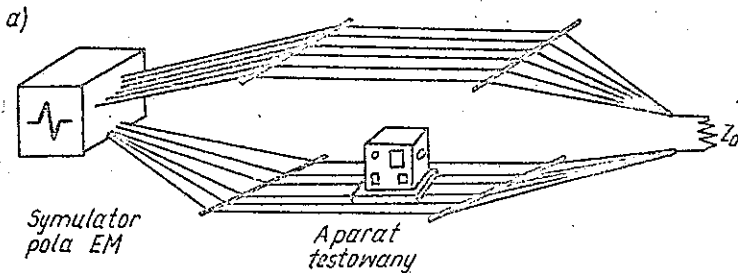
Czułość elementów na wielkość energii przenoszonej  
lub wywołanej przez pola elektromagnetyczne [11]



-  - próg zniszczenia
-  - próg zakłócania
-  - praca poprawna

rzowych w warunkach naturalnych, dlatego wykorzystuje się metody symulacji procesów zakłócających działanie sprzętu elektronicznego. Symulacja taka może służyć tylko do badania podatności urządzeń na zakłócenia elektromagnetyczne /nie można w ten sposób badać fizyki zjawisk zakłócających/. Symulacja techniczna może odbywać się dwoma sposobami:

- 1/ symulacja zjawiska w jego naturalnych rozmiarach i na obiektach rzeczywistych /samoloty, samochody/,
- 2/ symulowanie zjawiska w skali zredukowanej.



Rys. 20. Symulator narażeń elektromagnetycznych  
a/ w skali zredukowanej, b/ w skali 1:1 [11] [16]

Rys. 20a i b przedstawia oba te sposoby. Istotnym składnikiem systemu pomiarowego jest tzw. generator lub symulator pola elektromagnetycznego, którego zadaniem jest wytworzenie w ograniczonej przestrzeni użytkowej stanowiska pomiarowego, pola elektromagnetycznego o znanych i ewentualnie zmiennych parametrach. W przypadku rys. 20a przestrzeń pomiarowa ograniczona jest siecią równoległych drutów, tworzących specyficzną "antenę", wytwarzającą pole elektromagnetyczne we wnętrzu swojej struktury. Badany sprzęt jest umieszczany w środku symulatora, jak pokazuje rys. 20a.

Przy badaniu odporności na narażenia impulsowe, a więc również na pole elektromagnetyczne pioruna, zaleca się stosowanie określonego kształtu impulsu pomiarowego, tzw. znormalizowanego impulsu elektromagnetycznego. Normy i przepisy z reguły nie podają analitycznego opisu fali testowej a jedynie jej kształt w postaci rysunku. Impulsy takie można z dobrym przybliżeniem opisać ogólną zależnością:

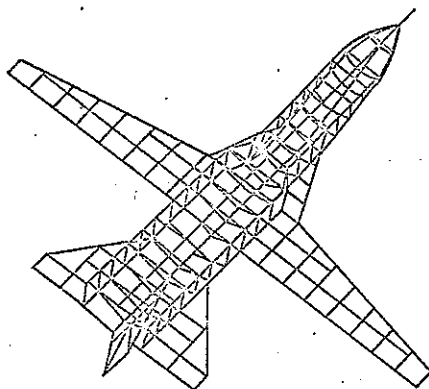
$$U(t) = U_{\max} \left\{ \exp(-t/\tau) - \exp(-t/\tau_n) \right\} \quad /4/$$

w której  $\tau$  - stała czasowa rozładowania obwodu generacyjnego symulatora oraz  $\tau_n$  - stała czasowa tego obwodu, opisująca czas narastania impulsu.

W przypadku dużych obiektów i gdy zależy nam na bardziej dokładnych wynikach nie można redukować skali zjawiska. Badania na dużych urządzeniach, maszynach /rys. 20b/ są drogie, wymagają wielkich mocy generatorów pola, ale ich wyniki dają pełniejszy i wierniejszy obraz zakłóceń powodowanych przez impulsy elektromagnetyczne.

Techniczna symulacja narażeń jest niezbędnym punktem wyjścia dla prac symulacji komputerowej. Teoria tych zjawisk cierpi jeszcze na brak dobrych czy pełnych modeli zagrożeń elektromagnetycznych. Rozwój techniki badań i pomiarów narażeń jest konieczny do określenia zależności i praw oddziaływań niepożądanych pól elektromagnetycznych na sprzęt elektroniczny.

ny, stanowiących podstawę algorytmów symulacyjnych. Wyniki symulacji muszą być przynajmniej do pewnego poziomu weryfikowane za pomocą pomiarów. Analiza komputerowa przepięć i przetężeń jest trudna, szczególnie w przypadku struktur i urządzeń złożonych - najczęściej modeluje się je siecią występujących w strukturze mechanicznej i elektrycznej przewodników traktowanych jak system antenowy umieszczony w polu elektromagnetycznym /rys. 21 - model samolotu F 111 stosowany dla celów symulacji komputerowej [11]/. W literaturze można znaleźć wiele przykładów obliczeń /komputerowych/ prądów i napięć wyindukowanych w sprzęcie telekomunikacyjnym przez impuls elektromagnetyczny pochodzący od pioruna.



Rys. 21. Samolot F-111 - modelowany siecią przewodników /756 elementów/ [11]

## 5. ZAKOŃCZENIE

Wyładowanie piorunowe jest jednym ze źródeł zagrożeń dla sprzętu telekomunikacyjnego. Narażenia elektromagnetyczne, zjawiska które je wywołują, czy to naturalne, czy związane z działalnością człowieka, sposoby pomiarów i przeciwdziałań są zagadnieniami, których waga została doceniona najwcześniej w krajach rozwiniętych. Trzeba zwrócić uwagę na to, że podatność układów elektronicznych na narażenia elektromagnetyczne rośnie



wraz ze zmniejszaniem się poziomów sygnałów użytecznych i mocy zasilania, co ma miejsce w przypadku stosowania układów LSI i VLSI. Równocześnie trudno sobie wyobrazić nowoczesny sprzęt bez najnowszych osiągnięć technologii elektronicznej. To powoduje, że już na etapie projektowania urządzeń elektronicznych konstruktor musi zdawać sobie sprawę, w jakim środowisku elektromagnetycznym projektowany sprzęt będzie pracował, jakim narażeniom będzie on podlegał oraz jak tym zjawiskom zapobiegać. Doprowadzenie bowiem urządzenia do stanu pełnej kompatybilności z otoczeniem po jego wyprodukowaniu jest drogie, nieefektywne, czasochłonne i nie zawsze możliwe. Badania wyładowań atmosferycznych, naturalnego zagrożenia elektromagnetycznego, pozwalają na zrozumienie samego zjawiska, przynoszą niezbędne informacje o jakościowym i ilościowym obrazie narażeń sprzętu, są więc niezbędne dla całości pojęcia środowiska elektromagnetycznego.

#### WYKAZ LITERATURY

1. Bogard J.K.: The hazard of lightning. The International Journal of Aviation Safety, vol. 2, No 2, IX, 1984.
2. Feynman R.P.: Feynmana wykłady z fizyki. Cz. II. PWN, 1971.
3. Le Boulch M.: Caracterisation et mecanismes du rayonnement VHF-UHF des decharges orangeuses. Praca doktorska. Uniwersytet Clermont II, 1984.
4. Hamelin J.: La Foudre - premiere partie: mecanismes et impact direct. L'Echo des Recherches, No 108, kwiecień 1982.
5. Jakubowicz J.L.: Podstawy teorii przepięć w układach energetycznych. PWN, 1968.
6. Praca zbiorowa: Rotkiewicz W., Strużak R.G. i inni: Kompatybilność elektromagnetyczna w radiotechnice. Roz. 2, WKiŁ, 1978.

7. Rodiere C.: Methodes et moyens d'essais lies a l'experimentation d'un systeme. Materiały na Colloque National et Exposition sur la Compatibilite Electromagnetique, Tregastel /Francja/ 1983.
8. Le Boulch M., Hamelin J.: Analyse spectrale VHF-UHF du rayonnement des eclaires. Colloque N. et E. sur la CE, Tregastel 1983.
9. Hamelin J., Leteinturier C.: Champ electromagnetique rayonne par des decharges orageuse - donnees experimentales et modeles theoretiques. Materiały na konferencję pn. Journees Nationales sur la Compatibilite Electromagnetique, Lille /Francja/ 1981.
10. Djeberi B., Hamelin J.: Influence des impulsions electromagnetiques sur les lignes aeriennes de Telecommunications. Journees N. sur la CE, Lille 1981.
11. Ianovici M. i inni: Compatibilite electromagnetique. Presse Polytechnique Romandes, Lozanna 1983.
12. Kapcow N.A.: Elektryczne zjawienia w gazach i wakuumie. GIT-TL, Moskwa 1950.
13. Aleksandrow M.S.: Fluktuacji elektromagnitogo pola Ziemi w diapazonie SNCz, Moskwa 1972.
14. Hamelin J., Leteinturier Ch.: La Foudre - effets a distance. L'Echo des Recherches, No 109, lipiec 1982.
15. Hołownia J.: Kompatybilność elektromagnetyczna we współczesnej technice. Referat w INCO /Wrocław/, 1984.
16. Dill I.: Activites de la D.T.C.A. dans le domaine du foudroiement des aeronefs. Tregastel 1983.

ZESTAWIENIE CIEKAWSZYCH REFERATÓW  
PRZEDSTAWIONYCH NA MIĘDZYNARODOWYCH SYMPOZJACH  
KOMPATYBILNOŚCI ELEKTROMAGNETYCZNEJ OD 1979 ROKU

- I. 3-rd Symposium and Exhibition on EMC, Rotterdam 1979
1. Hadrian W.: Reduction of electromagnetic disturbances in buildings caused by lightning using conductive facades.
  2. Montandon E.: Lightning induced overvoltages in buildings and installed equipments and recommendations for optimum protection.
  3. Hamelin J.: Electromagnetic field resulting from a lightning discharge, surges induced on overhead lines, mathematical models.
- II. IEEE International Symposium on EMC, San Diego, California 1979
1. Pearlman R.A.: Lightning near fields generated by return stroke current.
  2. Robb J.: VHF-UHF Precipitation Static Interference Effects on Aircraft.
- III. IEEE International Symposium on EMC, Baltimore 1980
1. Le Vine D.M.: The Spectrum of Radiation from Lightning Flashes.
  2. Rustan P., Uman M.: Charge distribution in lightning flashes.
  3. Hess R.: Test waveforms and Techniques for assessing the effects of lightning - induced transients.
- IV. Fifth International Wrocław Symposium on EMC, Wrocław 1980
1. Szpor S.: Polish lightning research-electromagnetic theories.

2. Horvath T. : A practical method of calculation of the induced voltage.
  3. Beyer D. i inni: Calculation of lightning effects on communication cable.
  4. Leteinturier C. i inni: Electromagnetic field emitted by lightning stroke. Theoretical model taking into account the ground conductivity. Comparison with experimental measurements made at St'Privat d'Alliers.
- V. IEEE International Symposium on EMC, Boulder 1981
1. Skouby C. : A new Model for the Simulation of lightning - Induced Transients.
  2. Lane R. : United States Navy Inservice Aircraft Lightning Strike and Damage Survey.
- VI. 4-th Symposium and Technical Exhibition on EMC, Zurich 1981
1. Martzloff F. : Transient overvoltage protection.
  2. Courty A. : Optical link for EMP and EMC measurement.
- VII. IEEE International Symposium on EMC, Santa Clara 1982
1. Perda R. i inni: Comparison of Experimental and Numerical Results for the interaction of a scale Model Aircraft with a Simulated Lightning Channel.
  2. Auckland D. : A model for Direct-Strike Lightning Excitation of a conducting body.
- VIII. 6-th International Wrocław Symposium on EMC, Wrocław 1982
1. Chary J. : Impact of lightning beams on a very high tower. Lightning frequency, current and electric field.
  2. Sowa A. : Numerical calculation of lightning voltage induced within transmission cables.

IX. 2-eme Colloque national et exposition sur la Compatibilite  
Electromagnetique, Tregastel 1983

1. Le Boulch i inni: Analyse spectrale VHF-UHF du rayonne-  
ment des eclairs.

X. 7-th International Wrocław Symposium on EMC, Wrocław 1984

1. Lundquist S., Cooray V.: Modelling of lightning.
2. Sowa A.: Transient induced voltages in communication and  
control systems in large industrial building which is  
stroken by lightning.
3. Scuka V.: EMI of lightning with digital communication  
systems.

ISSN 0209-1046

