

## PRZEPIĘCIA

### Wprowadzenie

**Przepięcie** - wzrost napięcia w urządzeniu elektrycznym powyżej jego najwyższego napięcia roboczego.

**Współczynnik przepięć** - wyraża amplitudę przepięć  $U_{pm}$  jako krotność amplitudy najwyższego napięcia roboczego urządzenia względem części uziemionych.

$$k_p = \frac{U_{pm}}{\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_{rm}} = \frac{\sqrt{3} U_{pm}}{\sqrt{2} U_{rm}}$$

$U_{rm}$  - wartość skuteczna najwyższego napięcia roboczego międzyprzewodowego w układzie trójfazowym.

Wartość  $k_p$  zależy od:

- rodzaju przepięć,
- rodzaju urządzeń,
- miejsca występowania w układzie elektrycznym.

## Podstawowe rodzaje przepięć

### Przepięcia wewnętrzne:

**dorywcze** (wolnozmiennie)  $k_p = 1,1 \dots 3$ :

**ziemnozwarciowe** przyczyna: trwałe zwarcie z ziemią,

**dynamiczne** przyczyna: nagłe wyłączenie obciążenia,

**rezonansowe** przyczyna: rezonans szeregowy, ferrorezonans,

**łączeniowe** (szybkozmiennie)  $k_p = 2 \dots 4$ :

**manewrowe** przyczyna: zamierzone czynności łączeniowe,

**awaryjne** przyczyna: przerywane zwarcie z ziemią.

### Przepięcia zewnętrzne:

**piorunowe**  $k_p > 5$ :

**bezpośrednie** przyczyna: uderzenie pioruna w urządzenie elektryczne (części czynne i konstrukcyjne),

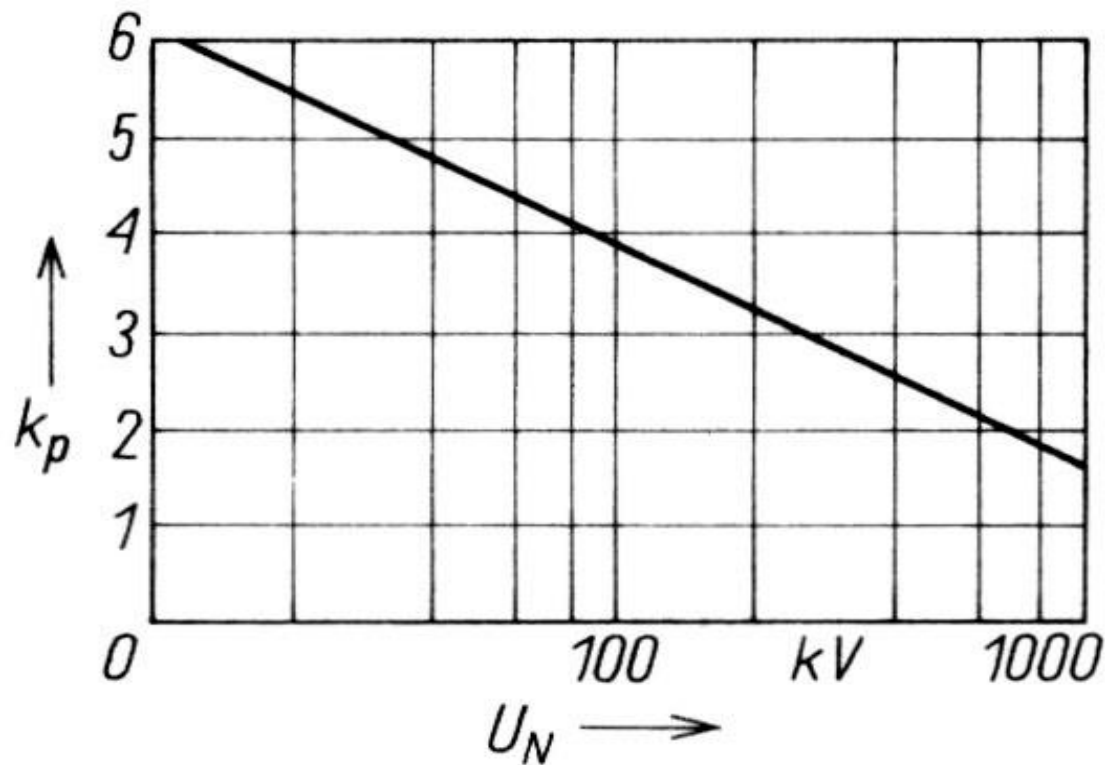
**indukowane** przyczyna: uderzenie pioruna w pobliżu urządzenia elektrycznego.

## Przebiegi czasowe przepięć

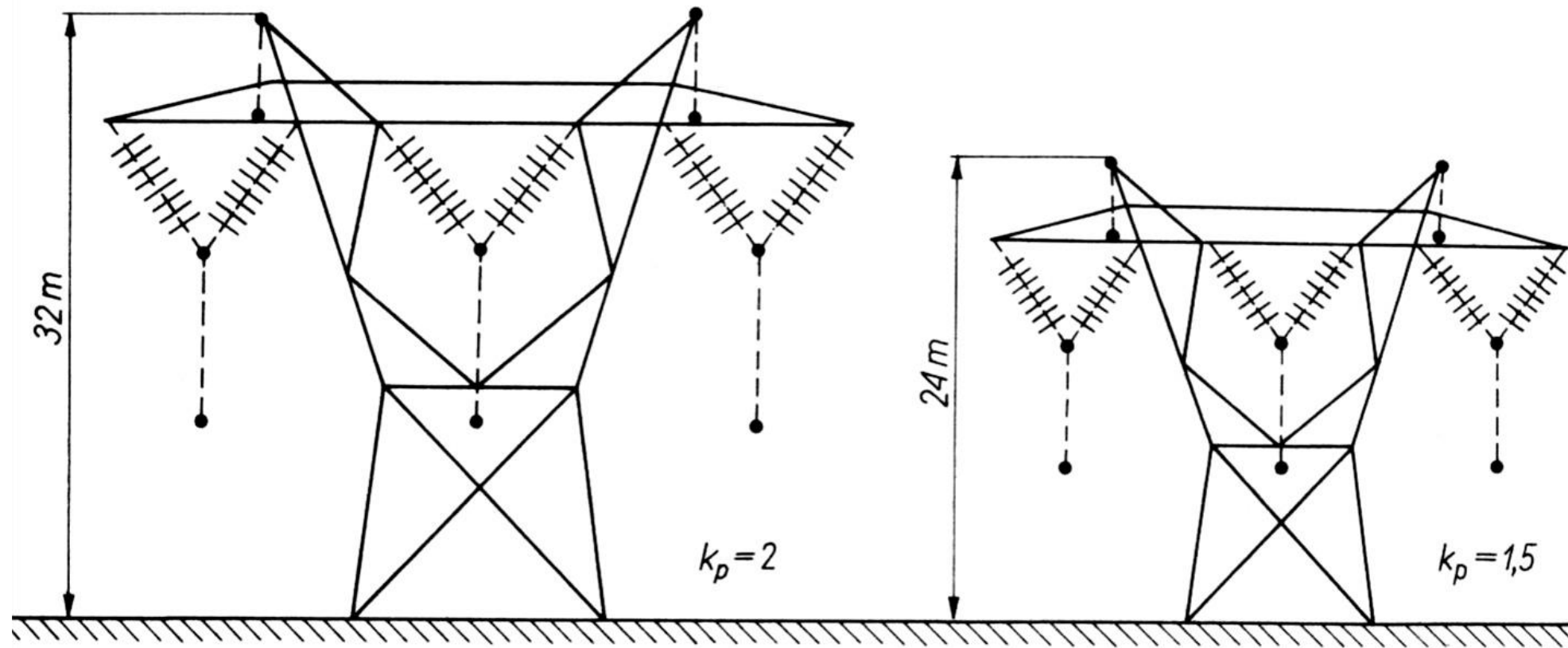
<b>przepięcie</b>	<b>przebieg czasowy</b>	<b>czas trwania</b>
ziemnozwarciowe, dynamiczne, rezonansowe	sinusoidalne 50 Hz	sekundy, minuty i dłużej
ferrorezonansowe	sinusoidalne 50 Hz (100 Hz, 150 Hz itp.)	sekundy, minuty i dłużej
łączeniowe	impulsowe zanikające oscylacyjnie	setki, tysiące mikrosekund
piorunowe	impulsowe zanikające zwykle aperiodycznie	dziesiątki, setki mikrosekund

## Wytrzymałość izolacji urządzeń sieciowych na przepięcia wewnętrzne

Konieczność stosowania rozwiązań ograniczających przepięcia wewnętrzne ze względu na koszty układów izolacyjnych.



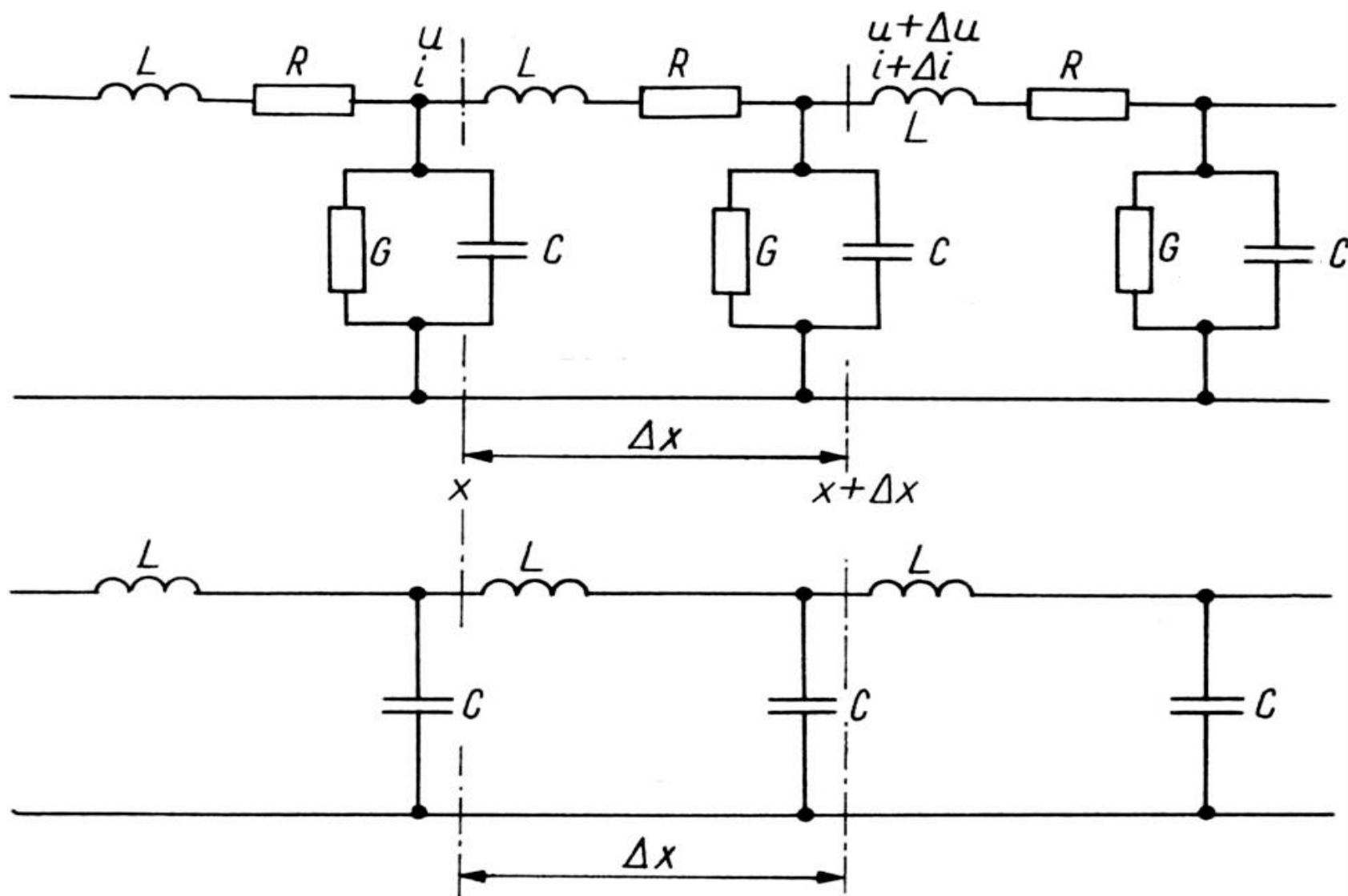
Stosowana względna wytrzymałość izolacji doziemnej przy przepięciach łączeniowych.



Wpływ współczynnika dopuszczalnych przepięć wewnętrznych na wymiary linii.

Fale przepięciowe w liniach elektroenergetycznych:

- linia powinna być traktowana jako obiekt o stałych rozłożonych,
- w obliczeniach stałe rozłożone zastępuje się stałymi skupionymi odniesionymi do jednostki długości linii.



Dla odcinka linii  $\Delta x \rightarrow 0$  prąd i napięcie spełniają równania:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial u}{\partial t} + Gu$$

W przypadku fal przepięciowych linia spełnia zwykle warunki linii bezstratnej, równania upraszczają się do:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = L \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = C \frac{\partial u}{\partial t}$$

Impedancja falowa linii  $Z$  i prędkość fali przepięciowej  $v$ :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

Po wstawieniu do równań:

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{Z}{v} \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$-\frac{\partial i}{\partial x} = \frac{1}{Zv} \frac{\partial u}{\partial t}$$

Po wyeliminowaniu prądu z pierwszego i napięcia z drugiego równania, uzyskuje się jednorodne równania falowe:

$$-\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

$$-\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}$$

Rozwiązanie d'Alemberta w postaci fal biegnących:

$$u = u'(x - vt) + u''(x + vt)$$

$$i = i'(x - vt) + i''(x + vt)$$



Fale biegnące od początku do końca linii:

$$u'(x - vt)$$

$$i'(x - vt)$$

Fale biegnące od końca do początku linii:

$$u''(x + vt)$$

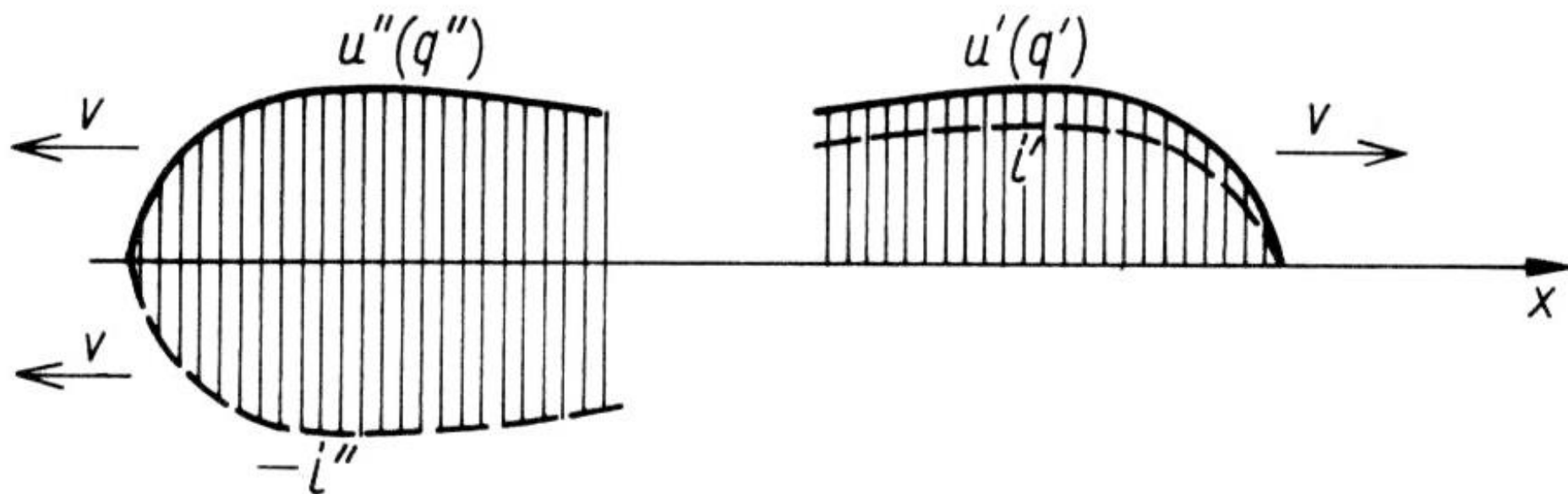
$$i''(x + vt)$$

Stosując zależności:

$$i' = +\frac{u'}{Z} \quad \text{oraz} \quad i'' = -\frac{u''}{Z}$$

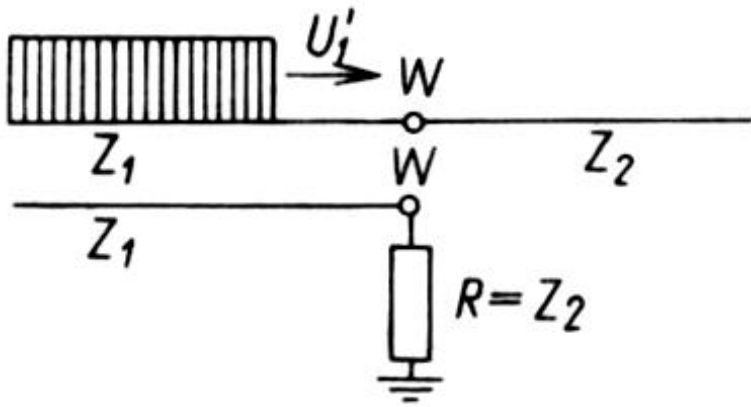
otrzymujemy:

$$i = \frac{1}{Z} [u'(x - vt) - u''(x + vt)]$$

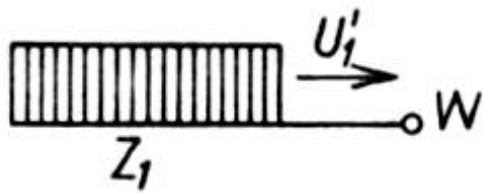
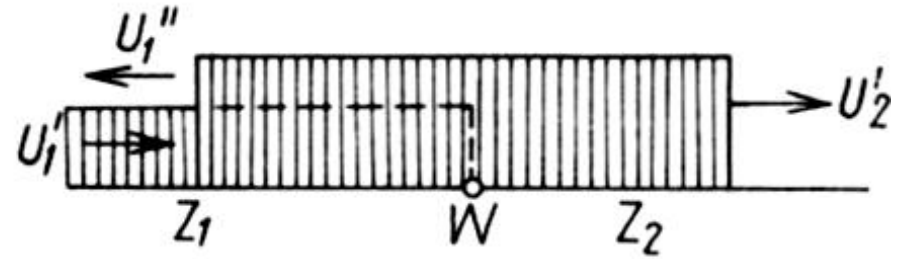


Obraz fal przepięciowych biegnących w linii w funkcji drogi  $x$

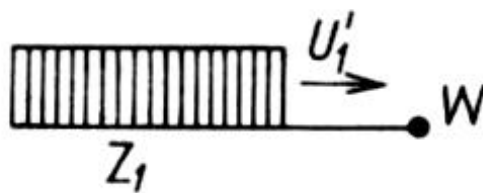
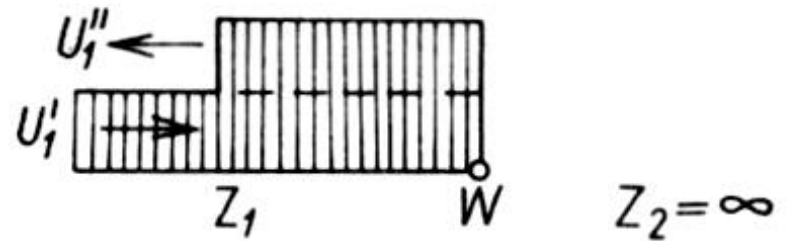
# Przejście fali przez węzeł sieci



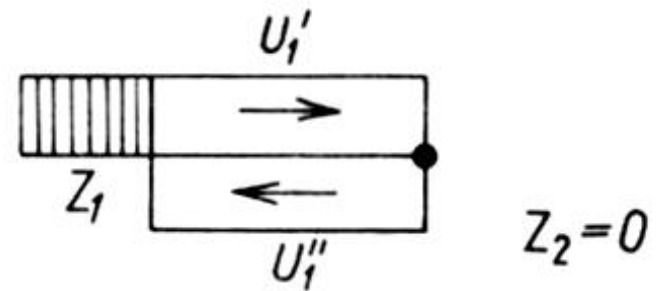
$$\alpha = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{2R}{Z_1 + R}$$



$$\alpha = 2$$



$$\alpha = 0$$



## Tłumienie i odkształcanie fal przepięciowych:

### - tłumienie oporowe:

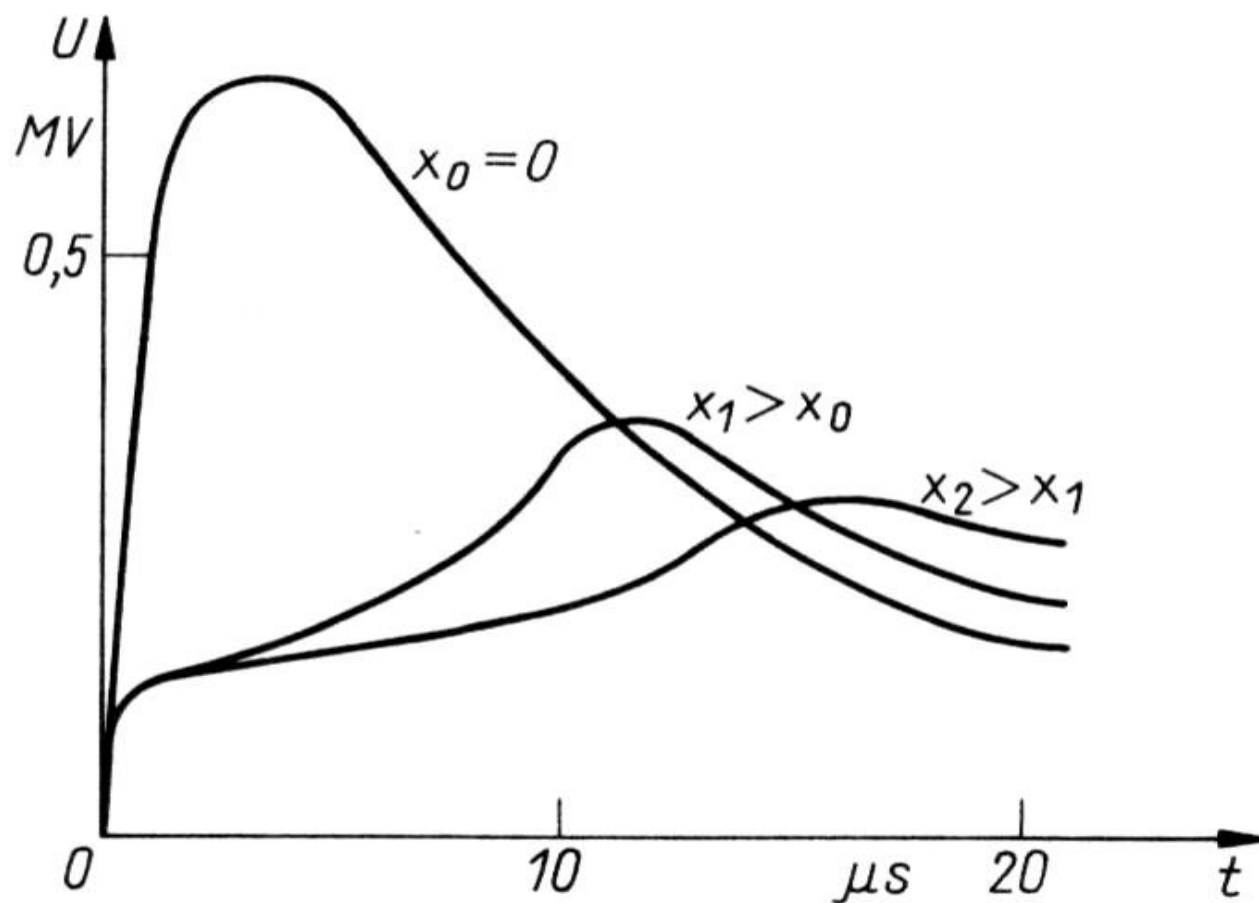
- strata energii w rezystancji przewodów (i ziemi),
- zmniejszenie stromości czoła i amplitudy,
- wpływ naskórkowości przy dużych stromościach;

### - tłumienie izolatorowe (pojemnościowe):

- ładowanie pojemności izolatora na czole fali,
- rozładowanie pojemności izolatora na grzbiecie fali,
- wydłużenie (spłaszczenie) fali przepięciowej;

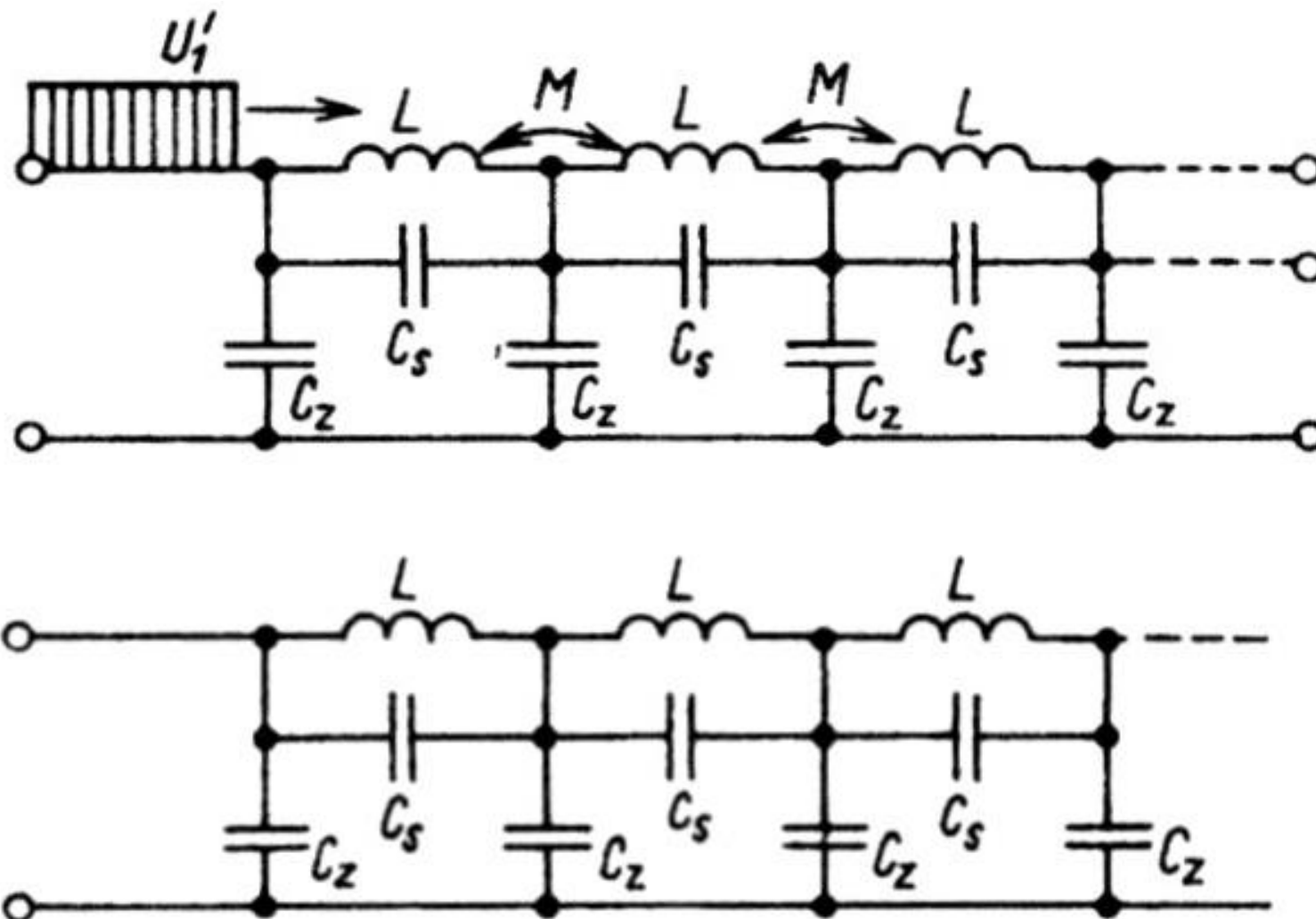
### - tłumienie ulotowe:

- strata energii przez odpływ ładunków z przewodów,
- strata proporcjonalna do  $(U_{pm} - U_j)^2$ ,
- zmniejszenie prędkości czoła powyżej napięcia jonizacji.

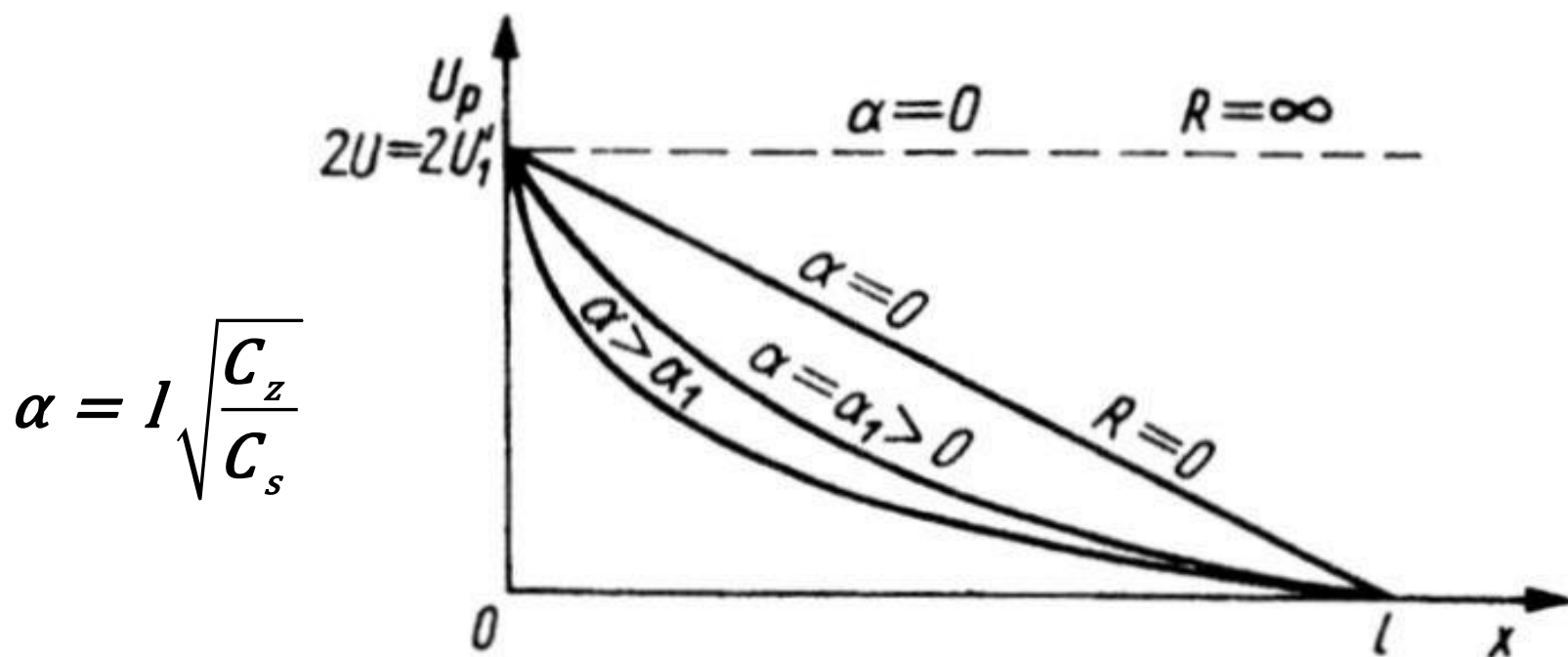
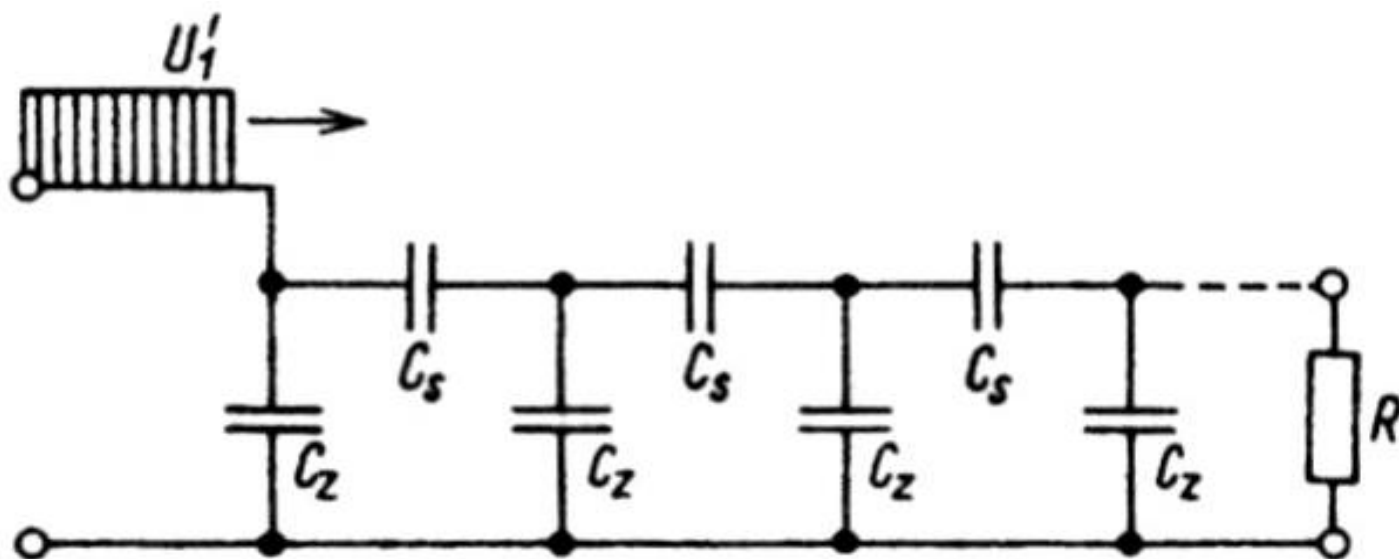


Wpływ ulotu na wartość amplitudy i kształt fali przepięciowej

## Fale przepięciowe w uzwojeniach transformatorów

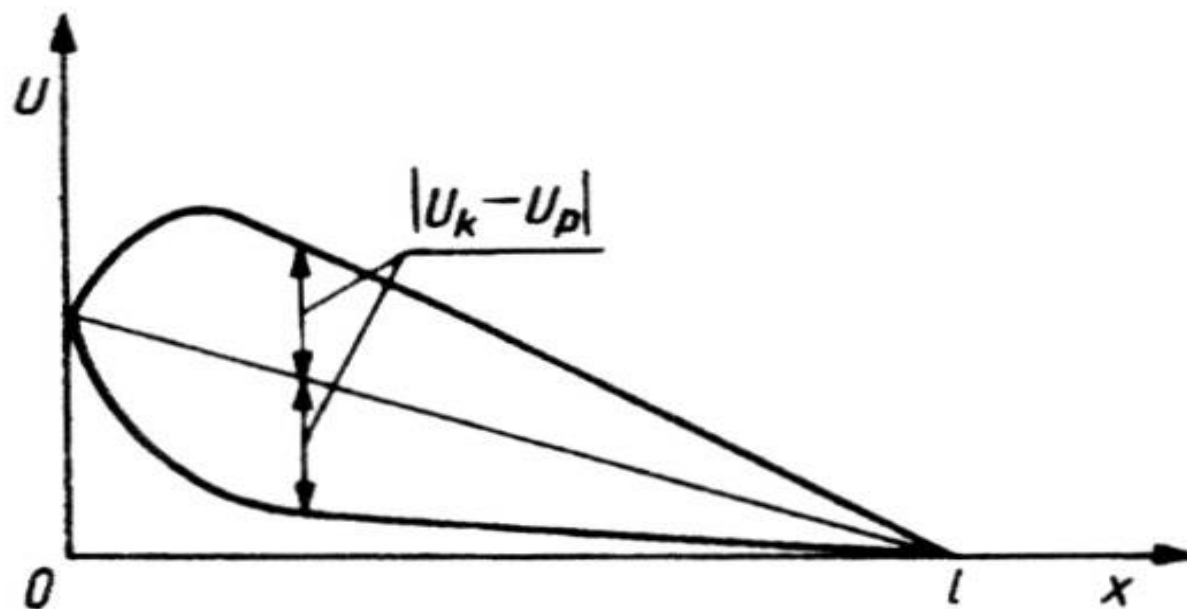


Schematy uzwojeń transformatora z uwzględnieniem sprzężeń międzycewkowych i uproszczony

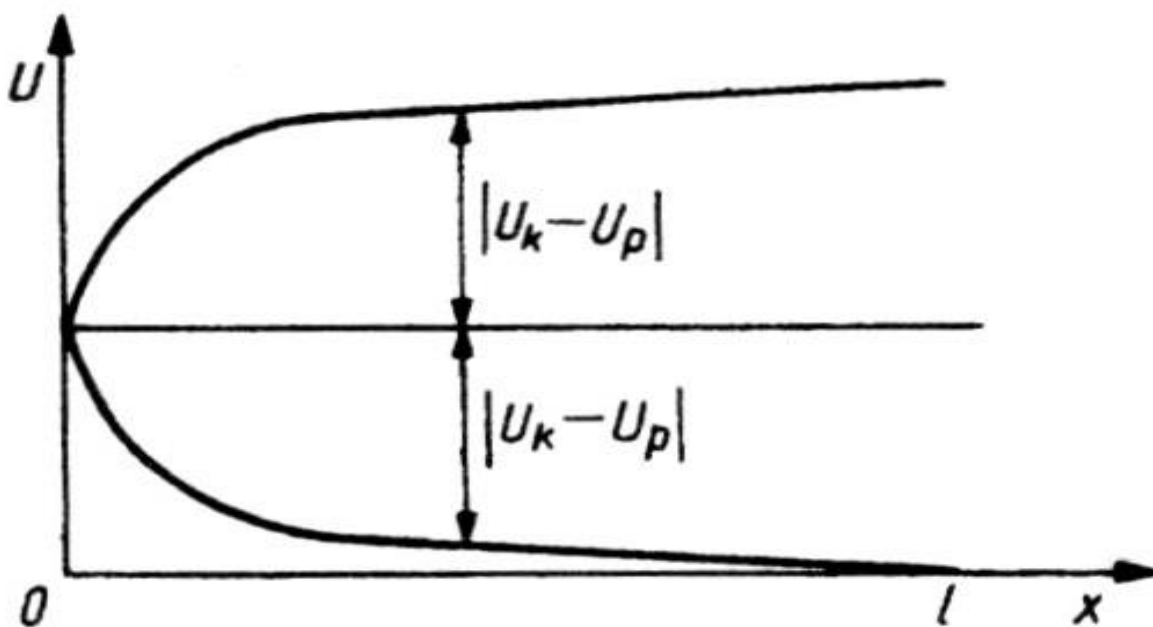


$$\alpha = l \sqrt{\frac{C_z}{C_s}}$$

Schemat i rozkład początkowy fali przepięciowej w uzwojeniu



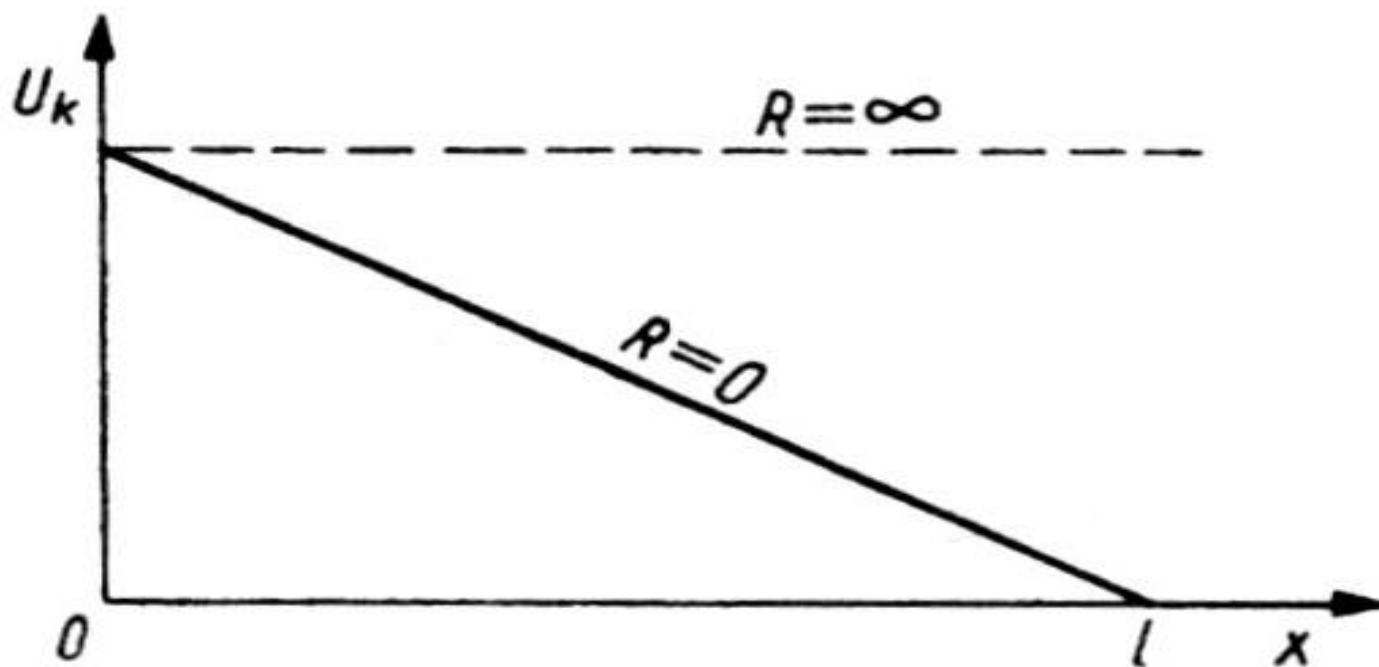
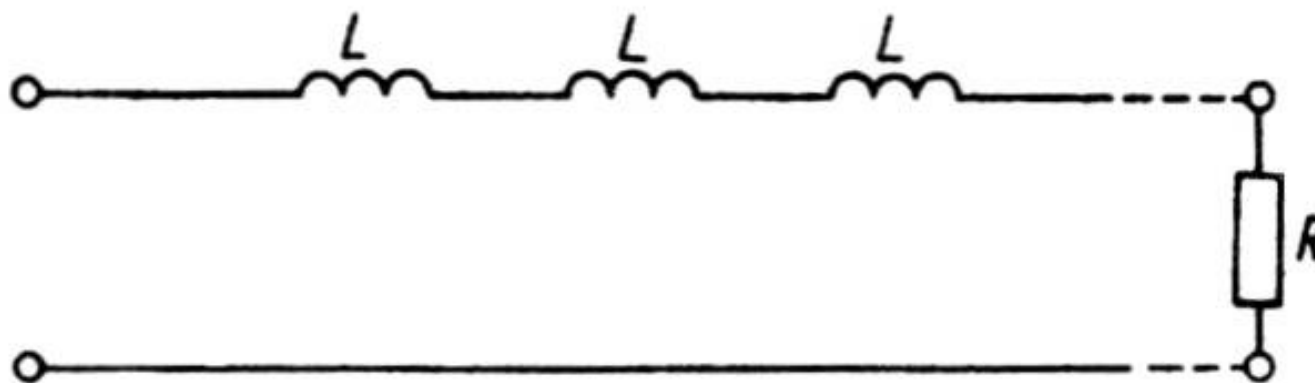
$$R = 0$$



$$R = \infty$$

Rozkład przejściowy fali przepięciowej w uzwojeniu,  
obwiednie drgań



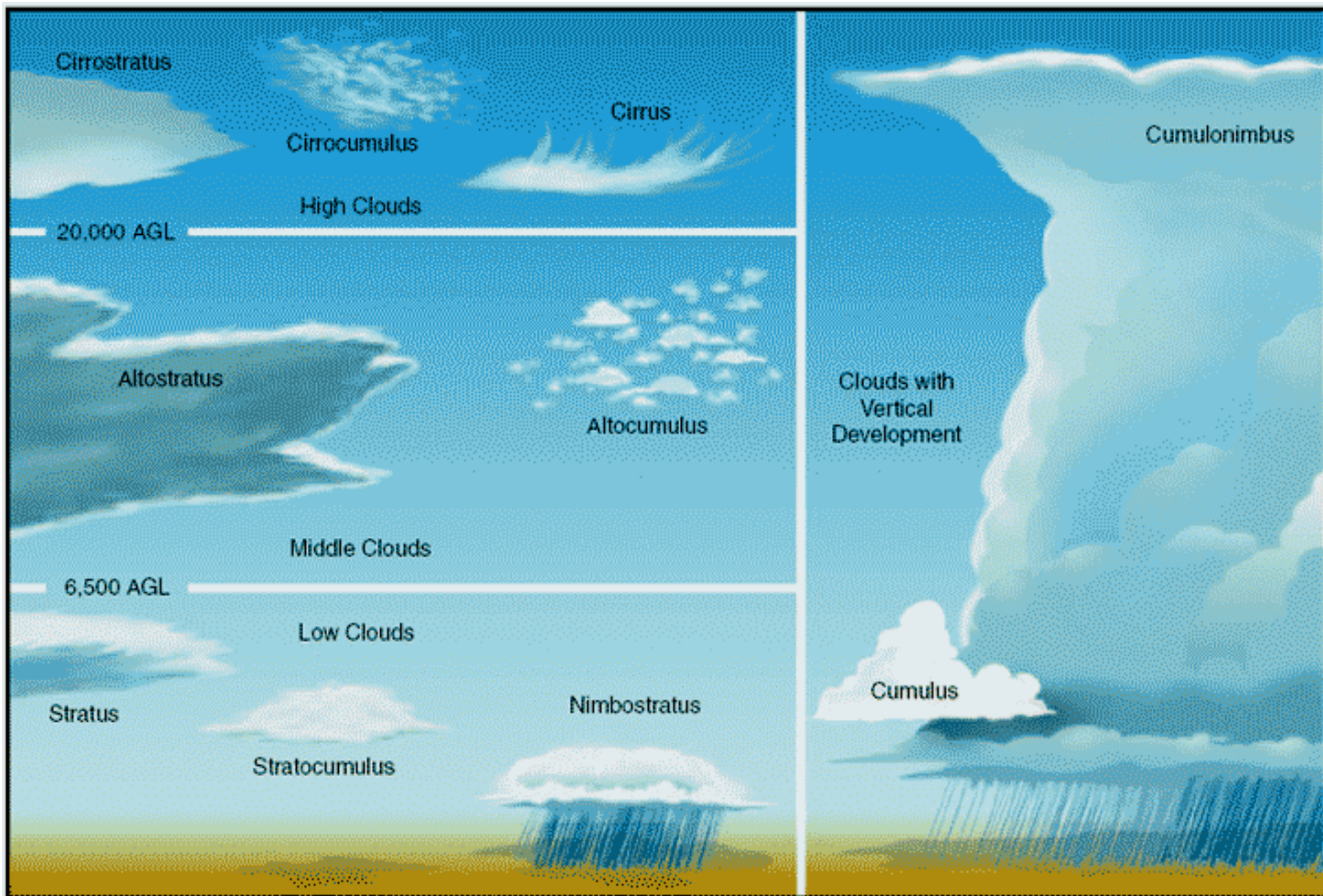


Schemat i rozkład końcowy fali przepięciowej w uzwojeniu

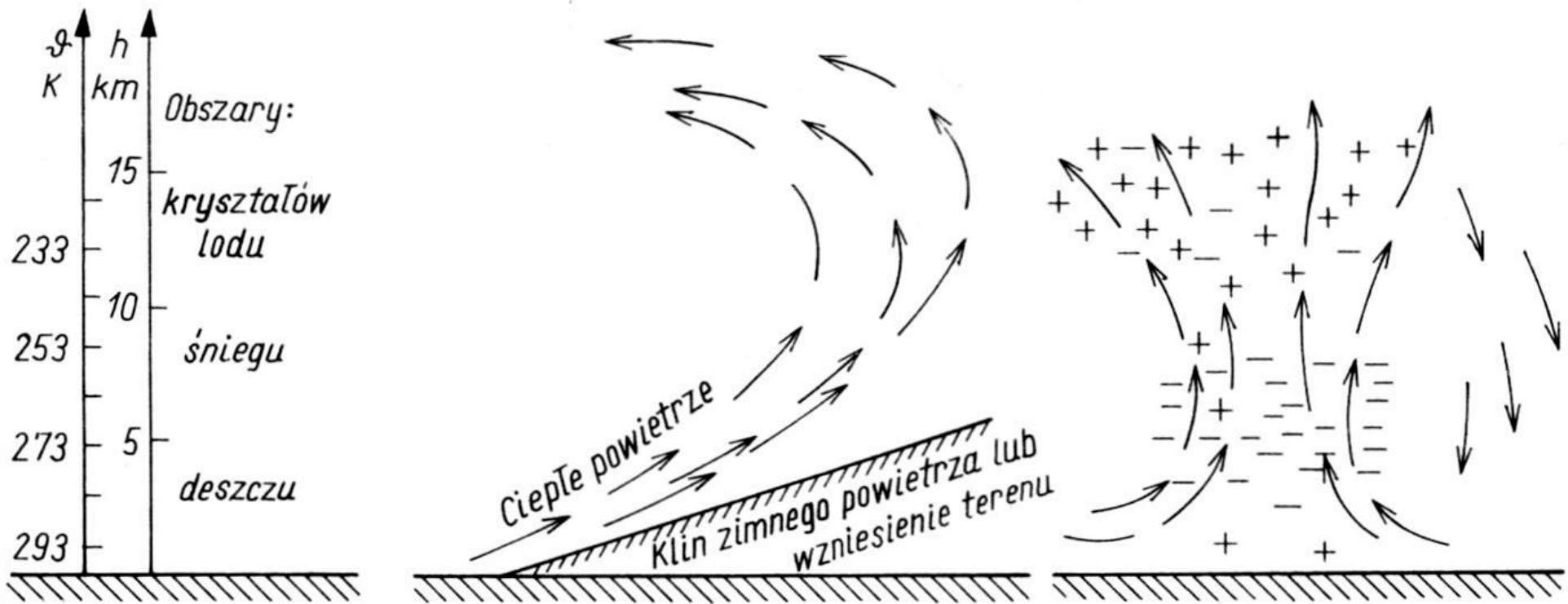
## Przebiegi atmosferyczne

### Burze piorunowe:

- burze frontowe (czołowe):
  - na granicy mas zimnego i ciepłego powietrza,
  - długość frontu: setki kilometrów,
  - prędkość przemieszczania frontu:  $> 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,
  - mała gęstość wyładowań piorunowych;
  
- burze termiczne:
  - nagrzanie i unoszenie mas wilgotnego powietrza,
  - mały teren (pojedyncze kilometry),
  - duża intensywność wyładowań.



Rodzaje chmur



Szkic powstawania chmur burzowych:  
burzy frontowej i burzy termicznej

## Mechanizm elektryzacji chmury burzowej:

- złożony, przypadkowy,
- niemożliwy dokładny opis.

## Przykładowe wcześniejsze teorie:

- influncyjna - opadające krople wychwytyją elektrony, dolna część chmury ujemna,
- rozrywanych kropeł - prąd wstępujący odrywa małe krople od dużych, rozdział ładunku: małe - ujemne, duże - dodatnie,
- rozrywanych kryształków lodu - rozdział ładunku na skutek narastania i pęknięcia kryształków lodu.





Rozwijający się cumulonimbus



Rozwinięty cumulonimbus



Czoło burzy frontowej

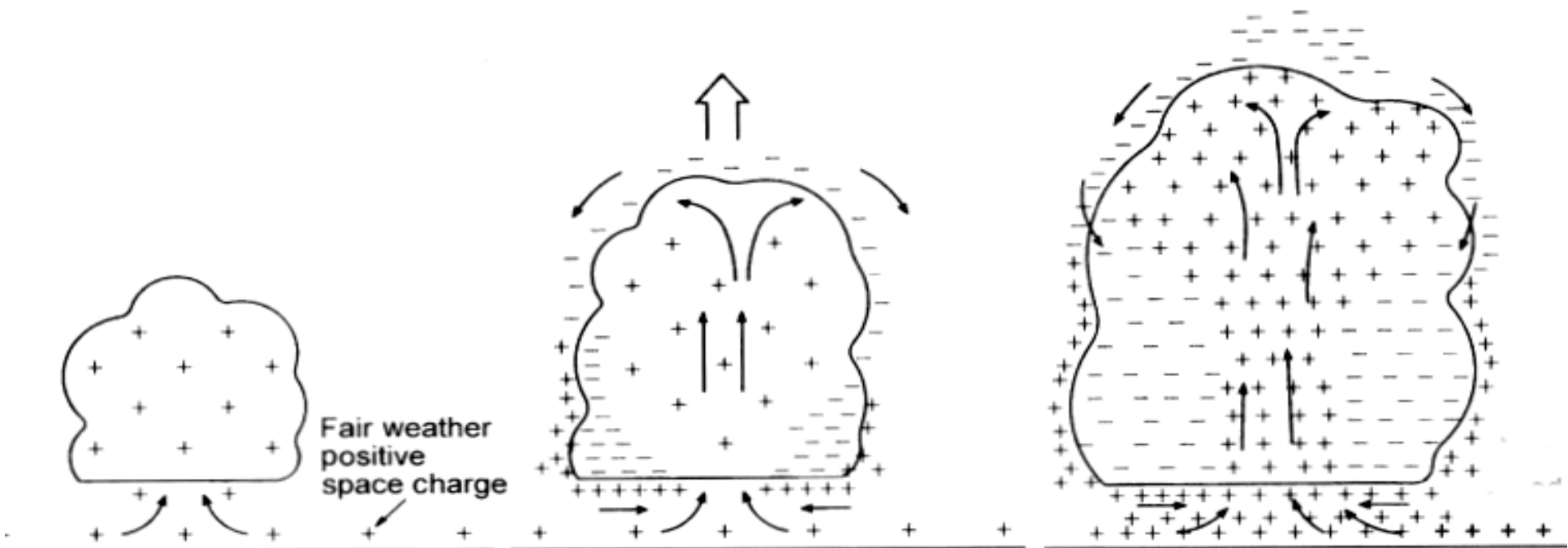


Burza termiczna



## Aktualne teorie elektryzacji chmury burzowej:

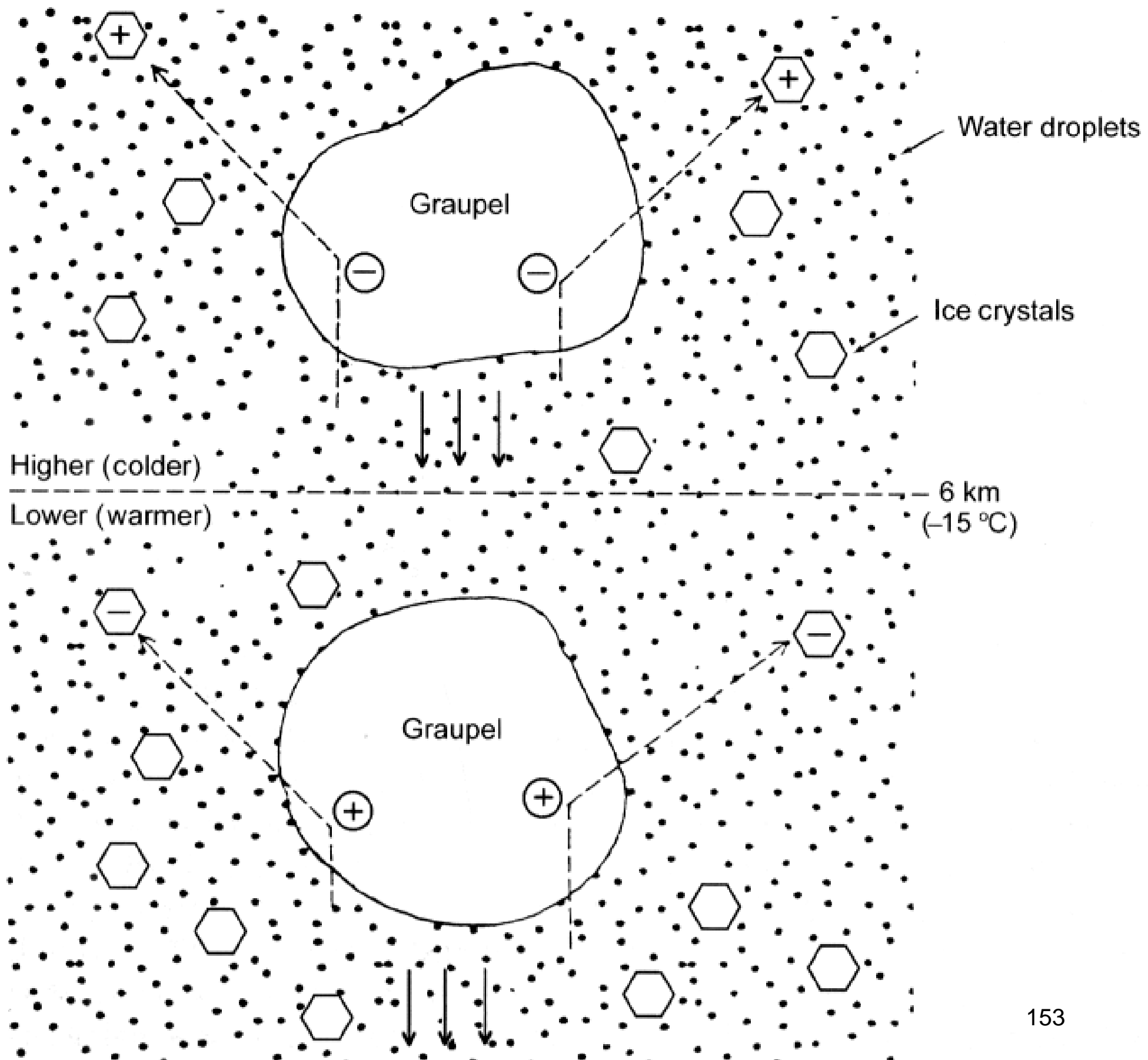
- mechanizm konwekcyjny - wstępujący prąd powietrza przenosi jony dodatnie do górnej części chmury,
- mechanizm krupy śnieżnej - opadająca krupa śnieżna przenosi ładunek ujemny do dolnej części chmury.

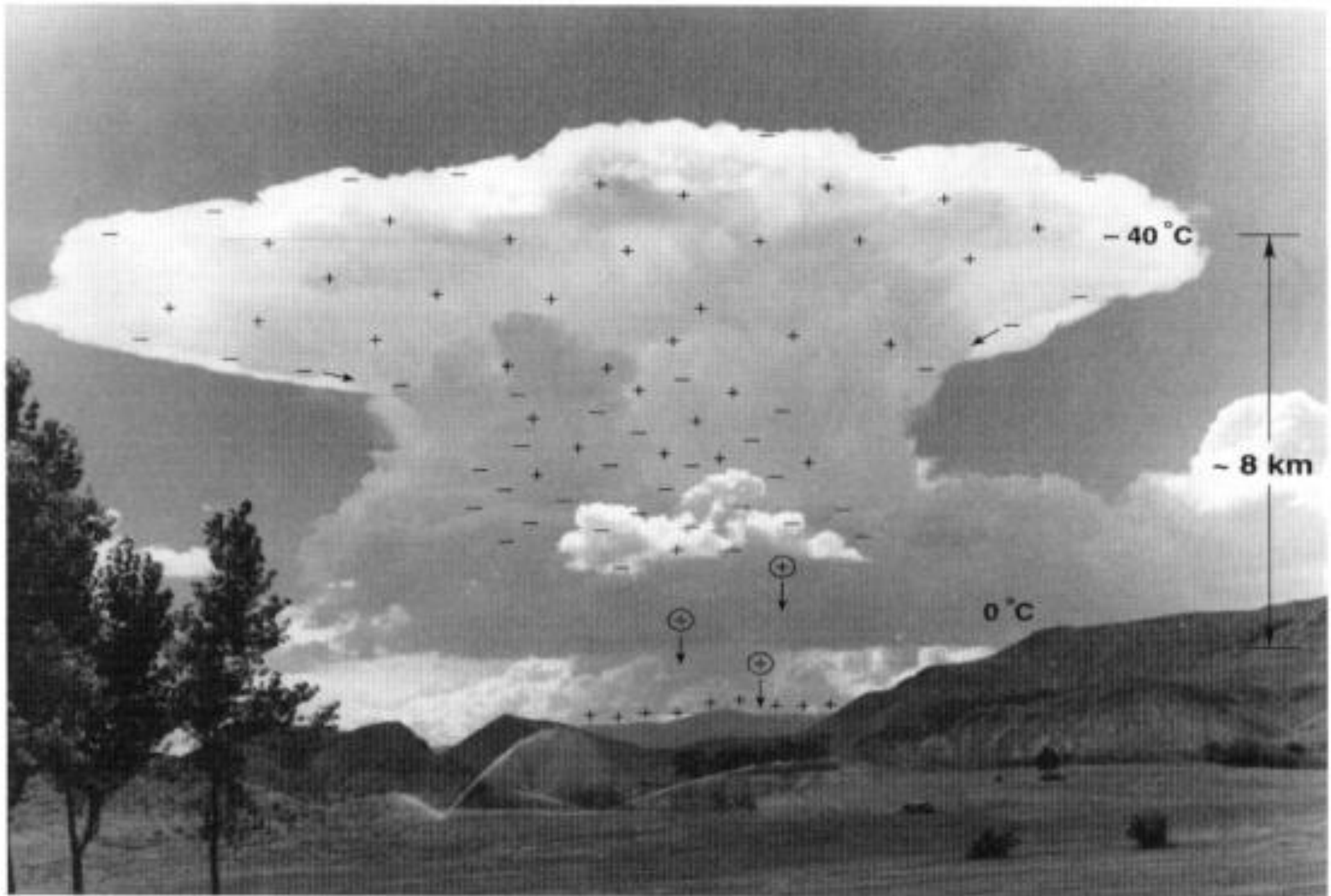


Szkic mechanizmu konwekcyjnego elektryzacji chmury burzowej

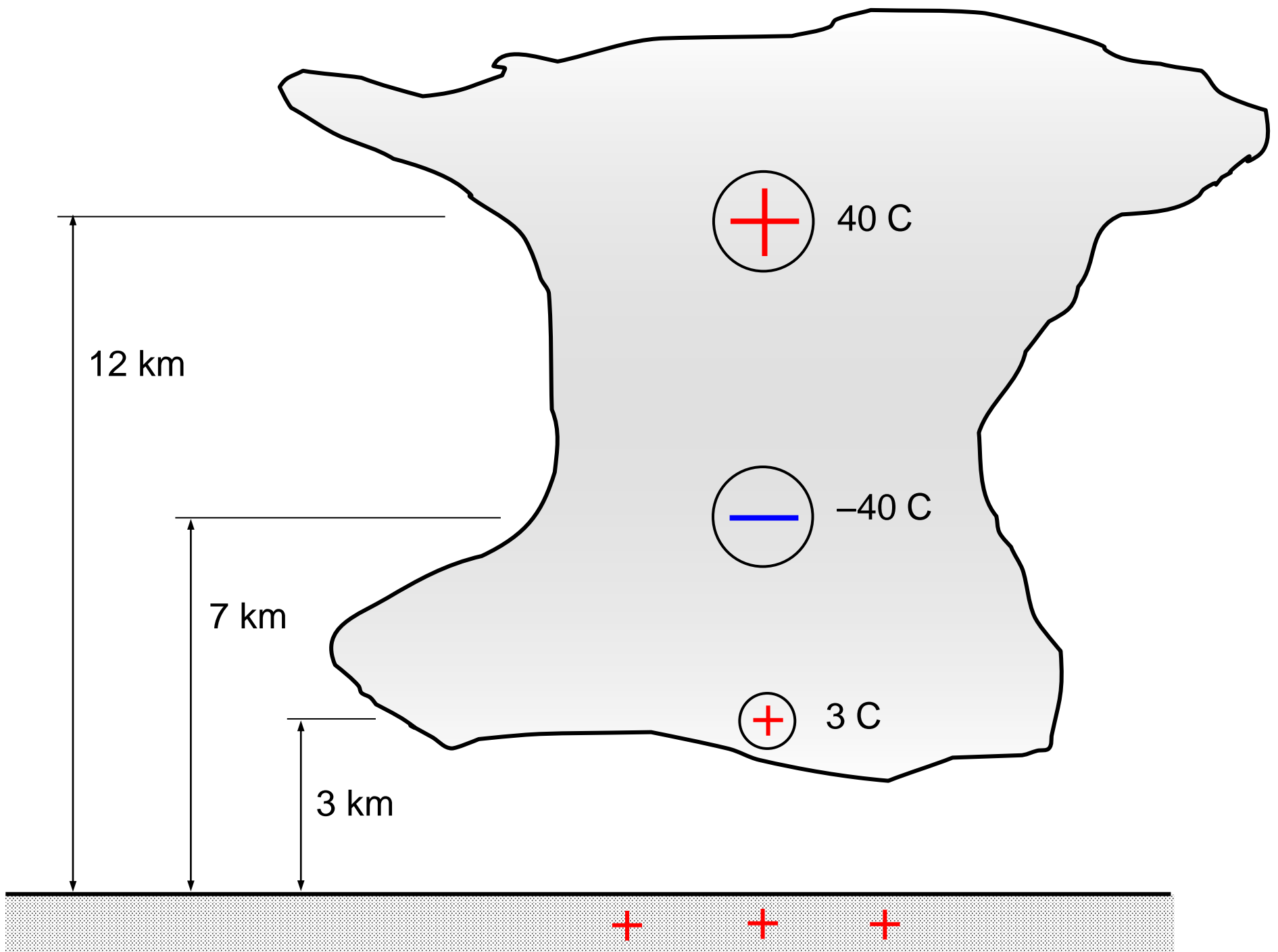


Fotografia miękkiego gradu (krupy śnieżnej)





Rozmieszczenie ładunków elektrycznych w chmurze burzowej



Rozmieszczenie ładunków elektrycznych w chmurze burzowej

## Wyniki badań chmur burzowych

Chmura burzowa - jedna lub kilka tzw. komór czynnych o wymiarach kilku kilometrów i średniej aktywności 0,5 godz.

Ładunek komory do  $10^3$  A·s, u góry - przewaga dodatniego, u dołu - przewaga ujemnego.

W przestrzeni ładunku ujemnego do kilkudziesięciu zagęszczeń (centrów) o ładunku do kilkudziesięciu amperosekund.

Natężenie pola pod komorą czynną - około  $100 \text{ V}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

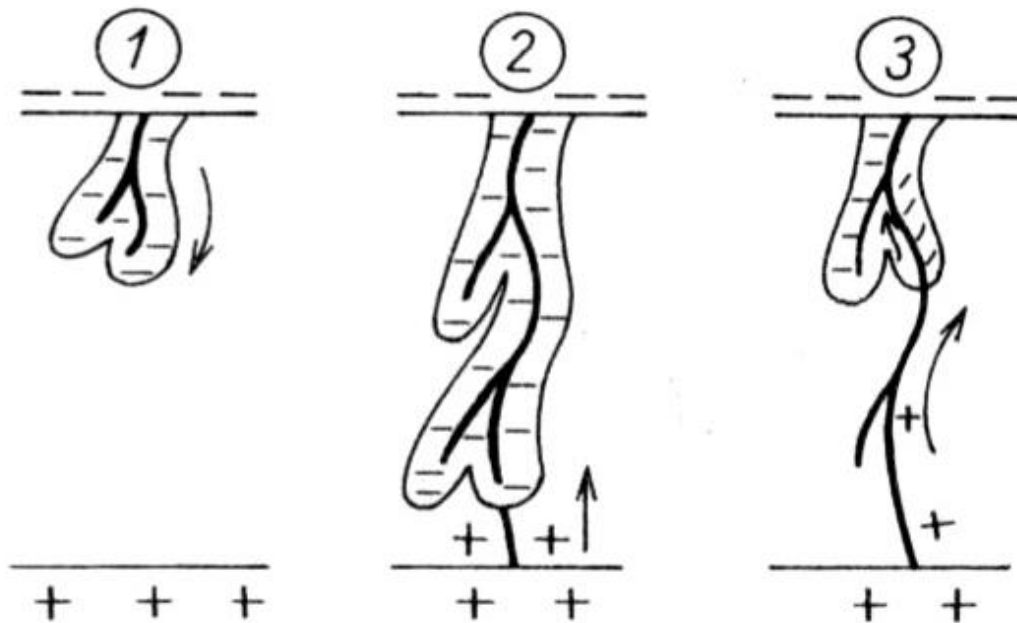
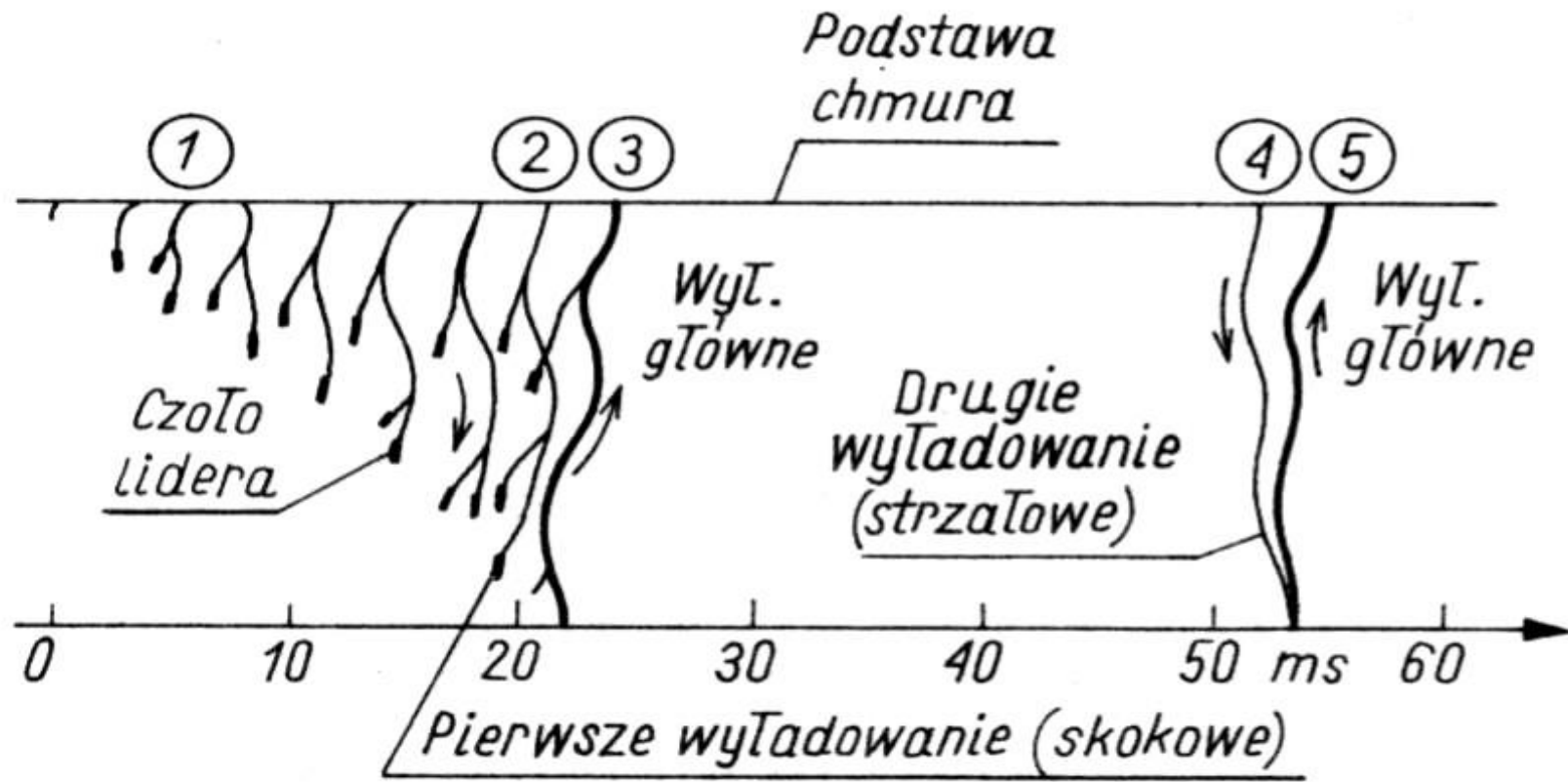
## Zapoczątkowanie rozwoju pioruna

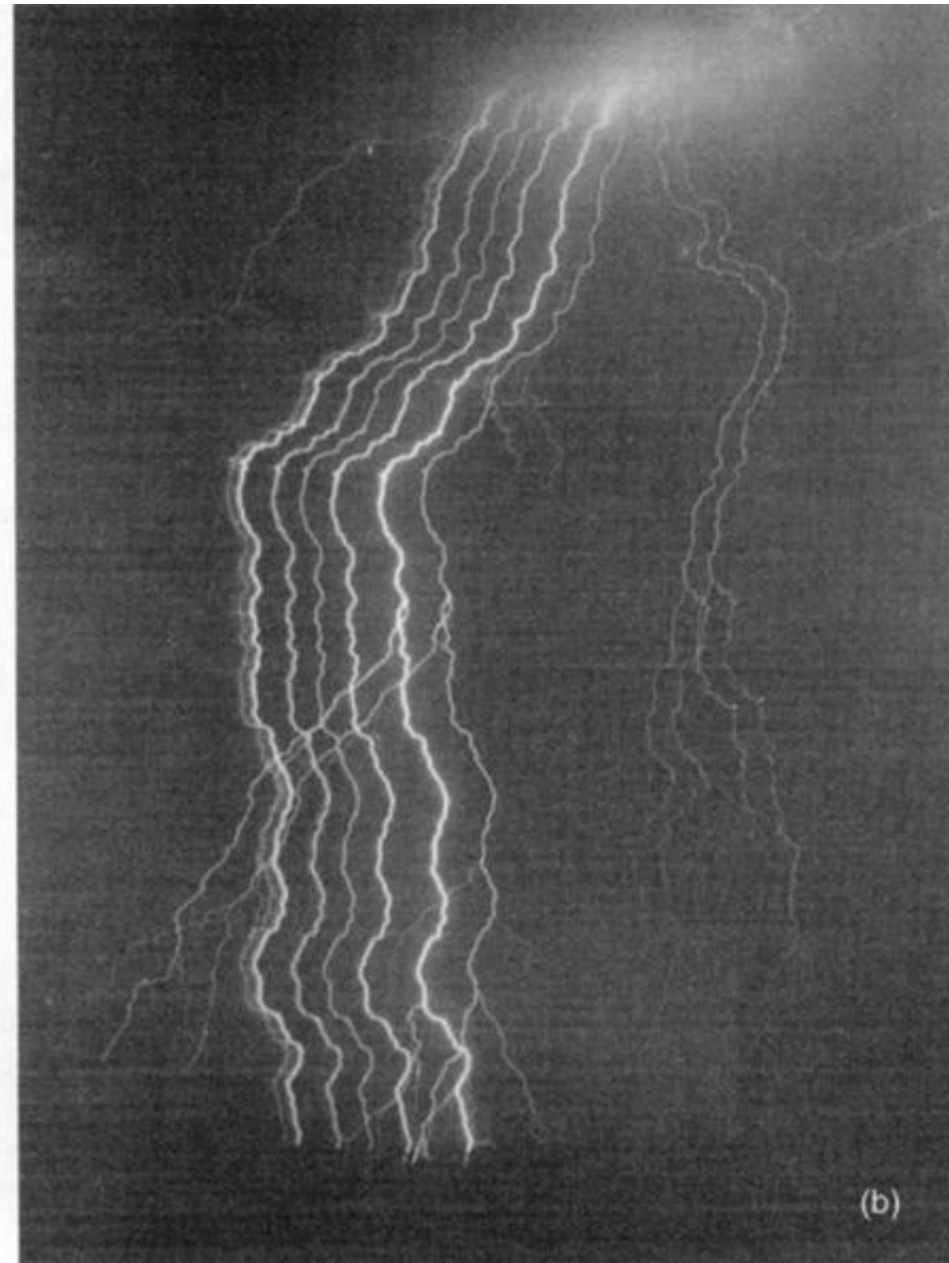
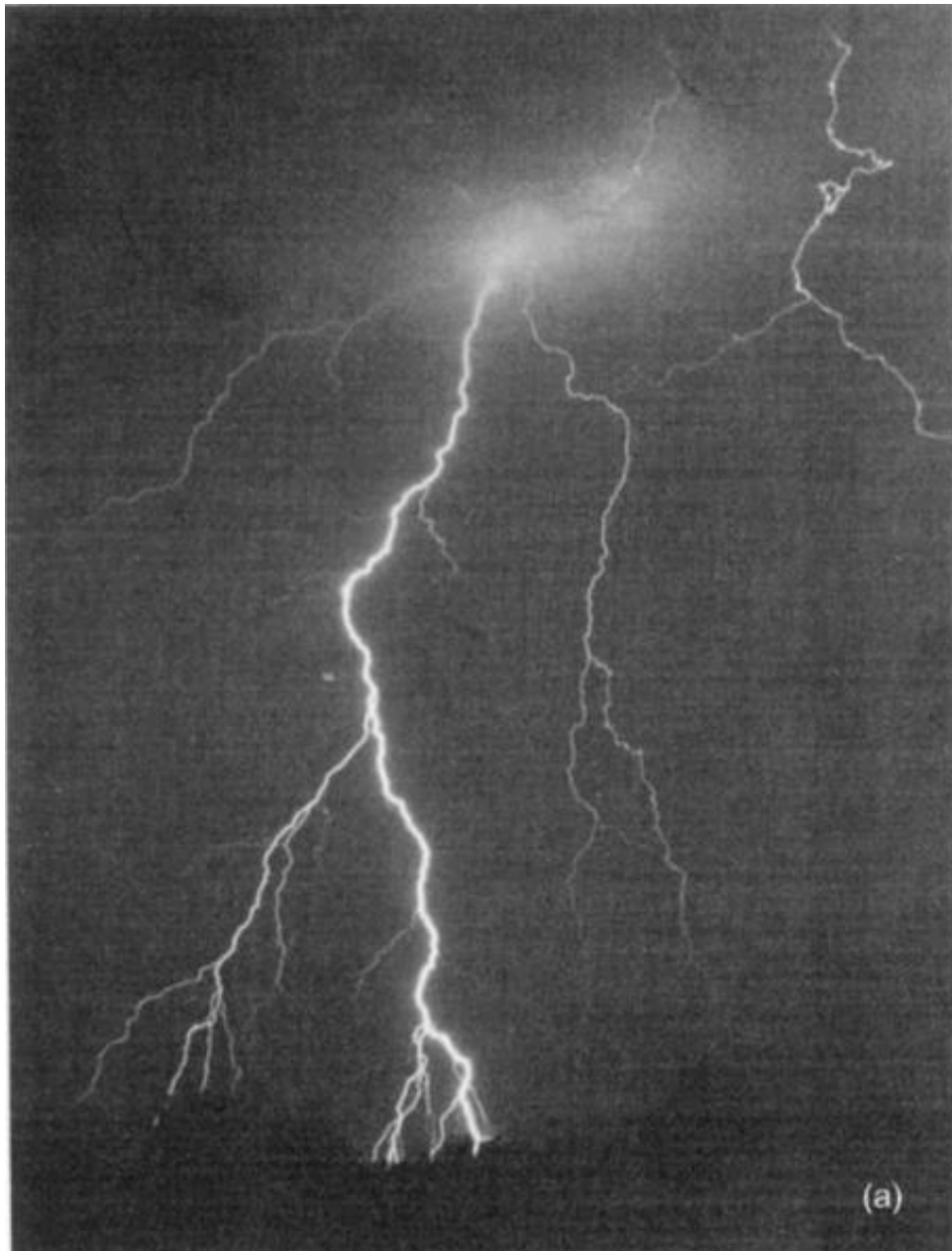
Warunek: przekroczenie  $1 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$  lokalnie w komorze.

Z kropeł deszczu lub kryształków lodu zaczynają rozwijać się wyładowania kanałowe i liderowe.

Zapoczątkowany kanał pioruna rozwija się skokowo.

Kierunek rozwoju - ładunek przestrzenny o przeciwnym znaku.





Fotografie pioruna: a) z kamery statycznej, b) z kamery ruchomej



**Wyładowanie wstępne skokowe (od chmury do ziemi):**

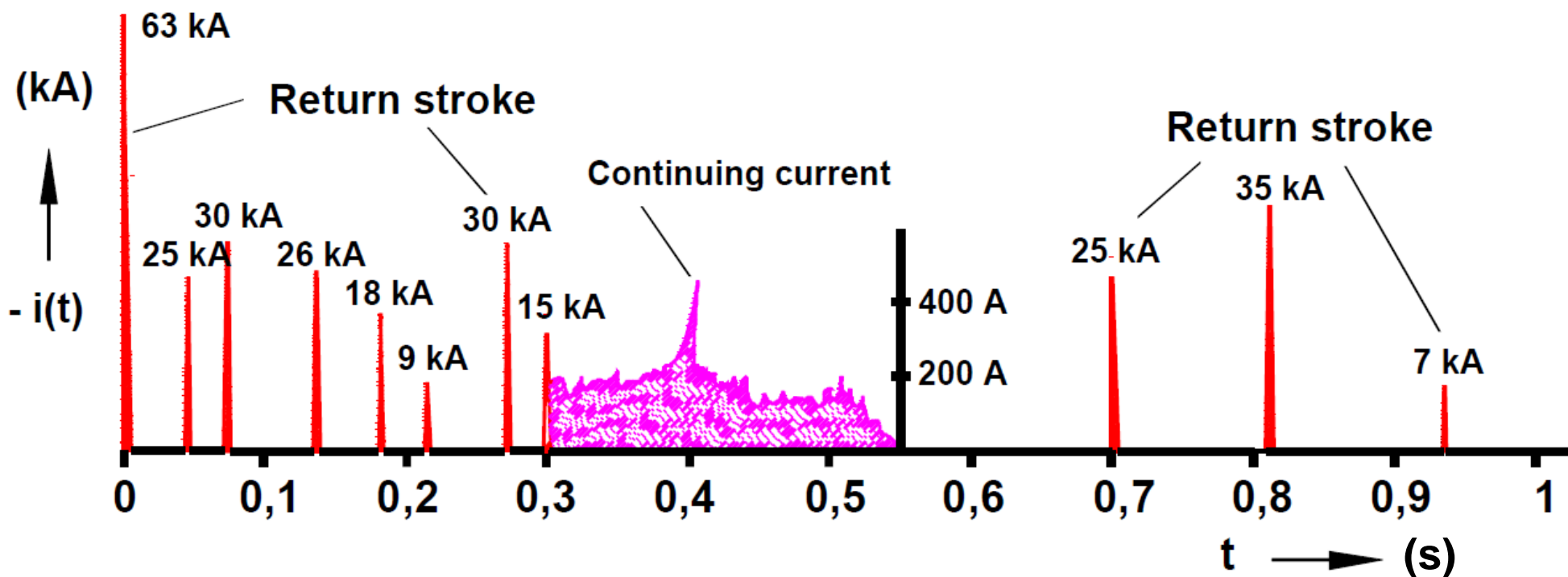
- po linii łamanej z rozgałęzieniami,
- długość skoku 10...100 m,
- prędkość lidera  $0,1 \text{ m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ,
- kilkumilimetrowy kanał silnie zjonizowany,
- ujemny ładunek w promieniu do 10 m,
- wartość prądu rzędu 100 A,
- odstępy między skokami - kilkadziesiąt mikrosekund,
- ostatni skok poprzedzony liderem rozwijającym się od ziemi,
- wyładowanie wstępne całkowite (zupełne) - dochodzi do ziemi,
- wyładowanie wstępne urwane (niezupełne).

**Wyładowanie główne** (od ziemi do chmury):

- połączenie wyładowania wstępnego z liderem oddolnym,
- przebieg wyładowania utworzonym kanałem w górę,
- początkowa prędkość rzędu  $100 \text{ m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ , maleje z czasem,
- średnia prędkość czoła wyładowania rzędu  $30 \text{ m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ ,
- prąd wyładowania głównego narasta w kilka mikrosekund,
- pomierzone wartości szczytowe prądu: 1...200 kA,
- następnie maleje wykładniczo (znacznie wolniej),
- osiąga połowę wartości szczytowej po:
  - kilkudziesięciu mikrosekundach w przypadku wyładowań o biegunowości ujemnej,
  - kilkuset mikrosekundach lub kilku tysiącach mikrosekund o biegunowości dodatniej.

## Piorun wielokrotny

- pojedyncze wyładowania występują w ok. 20 % przypadków,
- pozostałe wyładowania to pioruny wielokrotne,
- przyczyna: wiele centrów ładunku w komorze aktywnej,
- kolejne wyładowania w tym samym kanale,
- wyładowania wstępne - ciągłe (strzałowe),
- odstęp czasu między wyładowaniami - kilkadziesiąt milisekund,
- maksymalna liczba wyładowań wielokrotnych 40...50,
- średnia liczba wyładowań wielokrotnych 3...4.

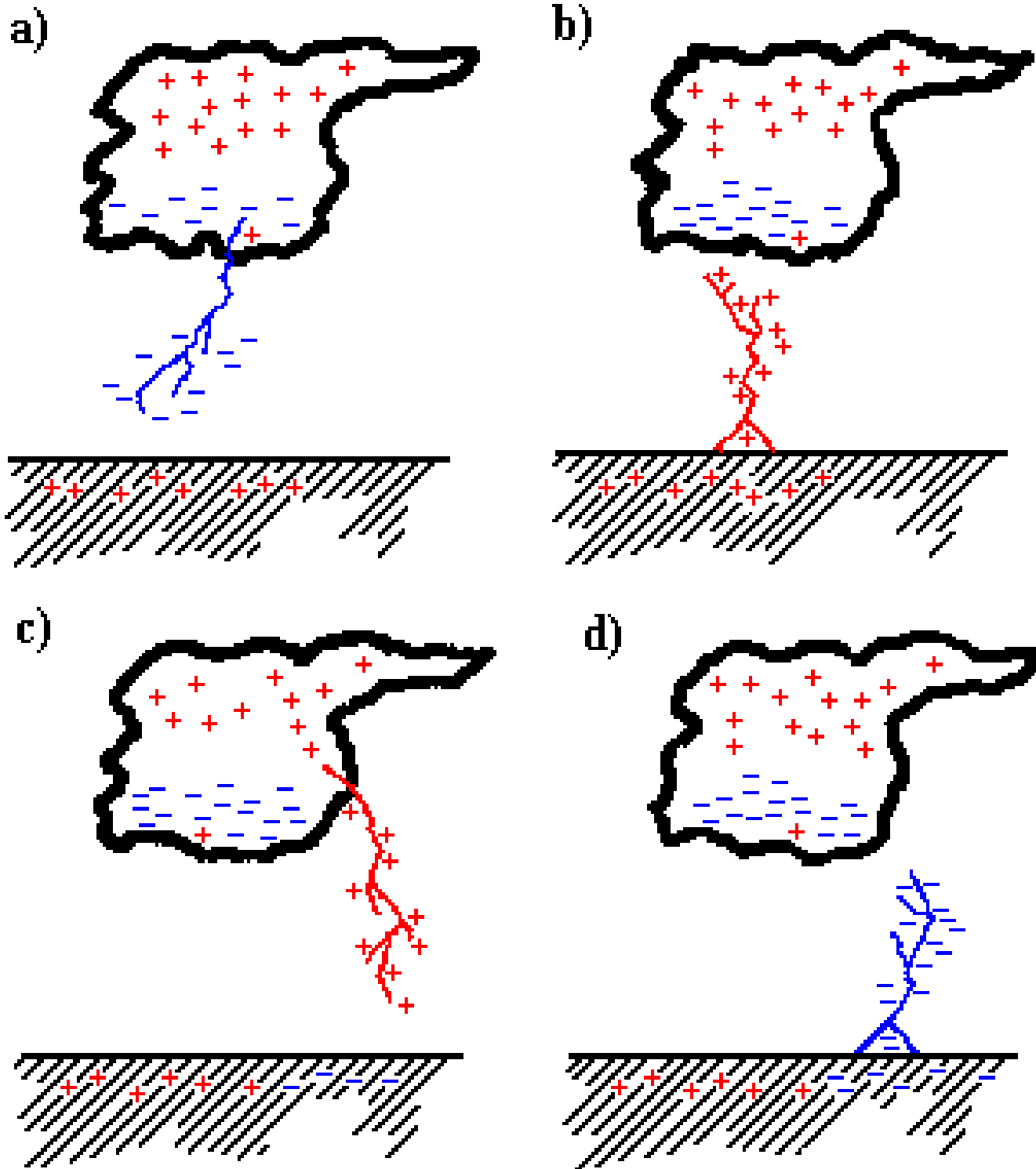


## Typy wyładowań piorunowych:

- 60 % wyładowań w chmurach lub między chmurami,
- pozostałe wyładowania między chmurami a ziemią,
- część wyładowań to wyładowania niezupełne (urwane),
- biegunowość wyładowania - znak ładunku w miejscu zapoczątkowania wyładowania.

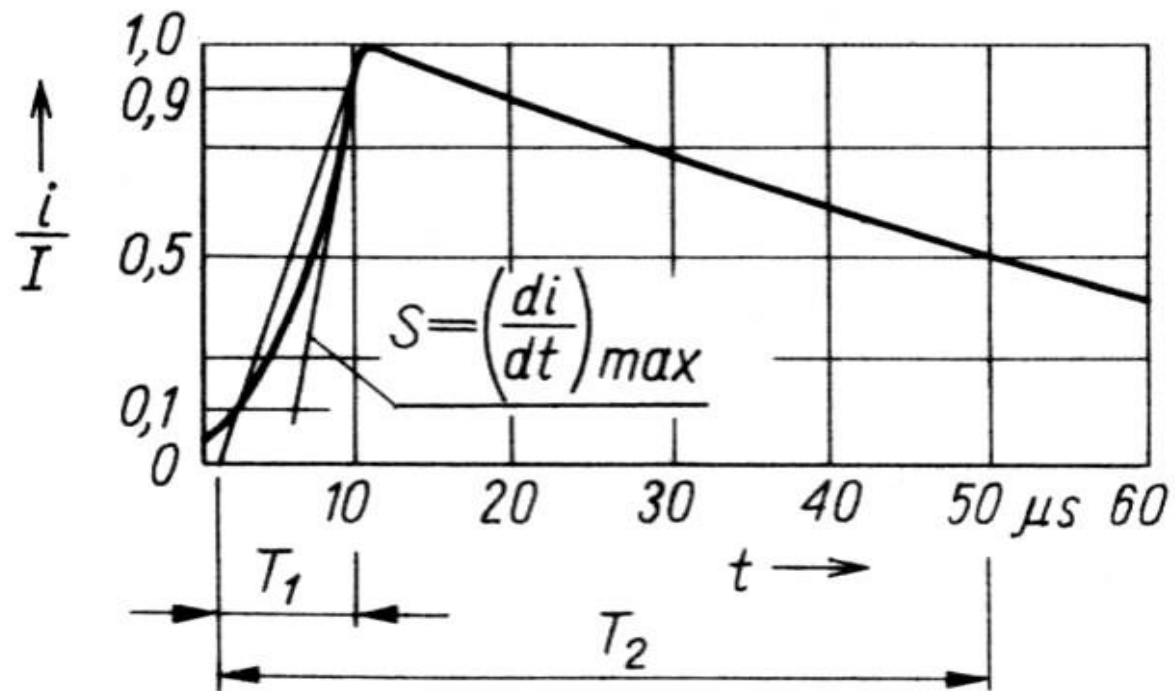
## Cztery typy wyładowań zupełnych między chmurami a ziemią:

- wyładowania odgórne ujemne - stanowią 80 % wyładowań na terenach nizinnych z niewysokimi obiektami,
- wyładowania odgórne dodatnie - bardzo rzadkie ,
- wyładowania oddolne ujemne - stanowią 13 % wyładowań rozwijających się najczęściej z obiektów wysokich,
- wyładowania oddolne dodatnie - występują w przypadku obiektów wysokich.

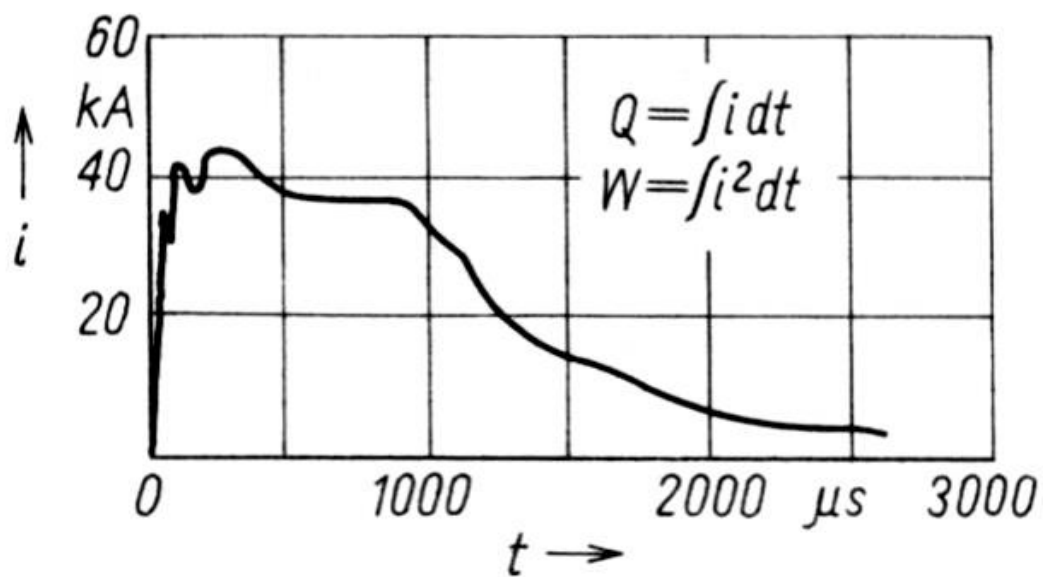
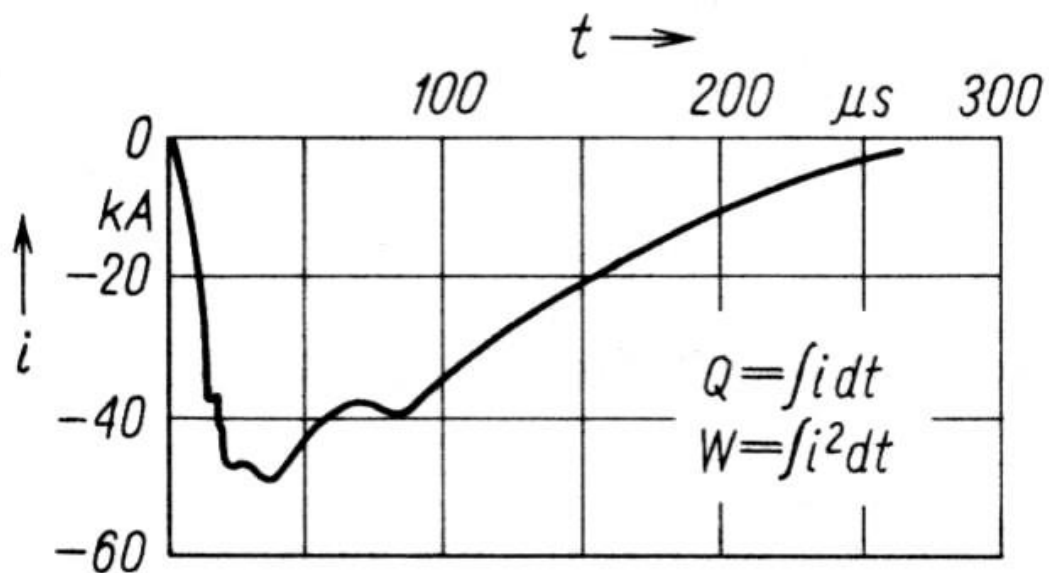


Typy wyładowań piorunowych: a) i b) ujemny z chmury do ziemi, c) i d) dodatni z chmury do ziemi

## Parametry wyładowań piorunowych



Idealizowany kształt prądu piorunowego z zaznaczonymi parametrami



Zarejestrowane przebiegi prądu piorunowego o biegunowości ujemnej i dodatniej

## Siedem parametrów wyładowań piorunowych:

- wartość szczytowa prądu pioruna,  $I$  [kA]
- czas trwania czoła,  $T_1$  [ $\mu\text{s}$ ]
- czas do półszczytu,  $T_2$  [ $\mu\text{s}$ ]
- maksymalna stromość narastania,  $S$  [ $\text{kA}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ ],  $(di/dt)_{\max}$
- ładunek przenoszony przez prąd,  $Q$  [ $\text{A}\cdot\text{s}$ ],  $\int i dt$
- impuls kwadratu prądu,  $W$  [ $\text{A}^2\cdot\text{s}$ ],  $\int i^2 dt$ , (energia właściwa)
- liczba udarów prądowych w wyładowaniu wielokrotnym,  $n$

Wymienione parametry mają charakter losowy.

Ich wartości są najczęściej zgodne z rozkładem logarytmiczno-normalnym, którego funkcja gęstości ma postać:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot x \cdot \sigma_x} \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{\ln^2 \frac{x}{X_m}}{\sigma_x^2} \right]$$



$x$  - ogólny symbol parametru wyładowania:  $I$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $S$ ,  $Q$ ,  $W$ ,  $n$

$X_m$  - wartość przeciętna  $X_{50\%}$  parametru wyładowania

$\sigma_x$  - odchylenie standardowe

Orientacyjne wartości przeciętne (średnie) parametrów wyładowań piorunowych:

**$I$**  25 kA,

**$T_1$**  2,2  $\mu\text{s}$  (udary ujemne), 20  $\mu\text{s}$  (udary dodatnie),

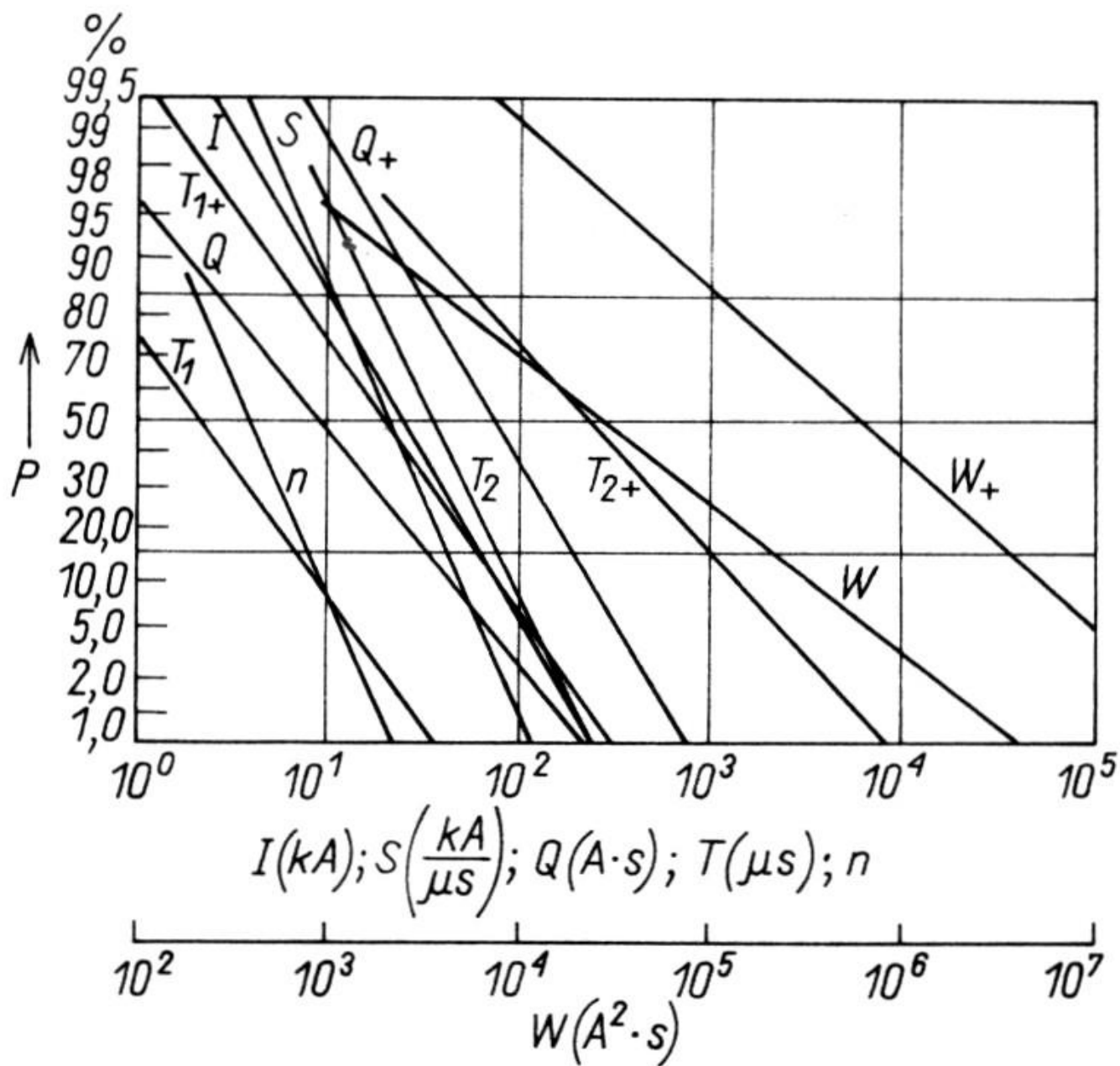
**$T_2$**  54  $\mu\text{s}$  (udary ujemne), 300  $\mu\text{s}$  (udary dodatnie),

**$S$**  22  $\text{kA}\cdot\mu\text{s}^{-1}$ ,

**$Q$**  9,2 A·s (udary ujemne), 80 A·s (udary dodatnie),

**$W$**   $40\cdot 10^3 \text{ A}^2\cdot\text{s}$  (udary ujemne),  $700\cdot 10^3 \text{ A}^2\cdot\text{s}$  (udary dodatnie),

**$n$**  3,8.



Skumulowane rozkłady (dystrybuanty) parametrów wyładowań piorunowych



Wyładowania między chmurami



Przykład wyładowania piorunowego



Przykład wyładowania piorunowego



Przykład wyładowania piorunowego



Przykład wyładowań piorunowych

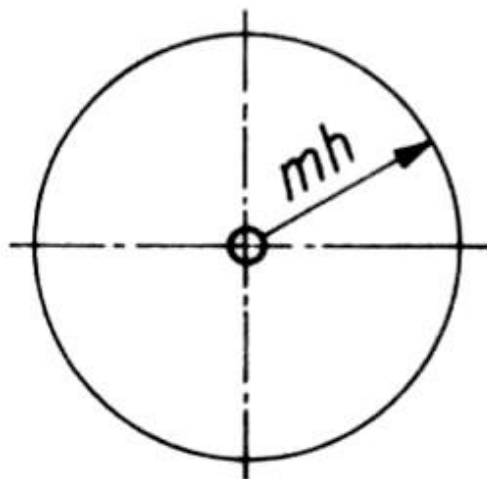
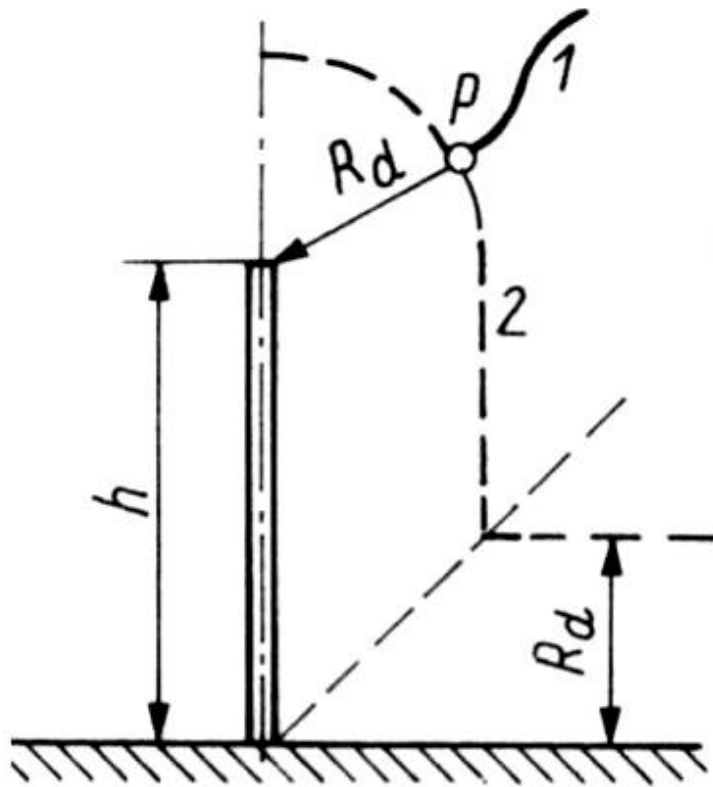
**Zagrożenie piorunowe obiektów naziemnych:**

- intensywność burzowa na danym terenie - mapy burzowe,
- poziom izokerauniczny - liczba  $N_d$  dni burzowych w roku
- częstość (gęstość) wyładowań piorunowych  $N_r$  [ $\text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ]
- $N_r$  można wyznaczyć z zależności  $N_r = f(N_d)$
- w Polsce  $N_d = 20 \dots 30$  dni burzowych w roku (średnio)  
daje to  $N_r = 1,8 \dots 3 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$
- obecnie  $N_r$  uzyskuje się dzięki systemom automatycznej lokalizacji i rejestracji wyładowań piorunowych

**Zbieranie wyładowań przez obiekty naziemne:**

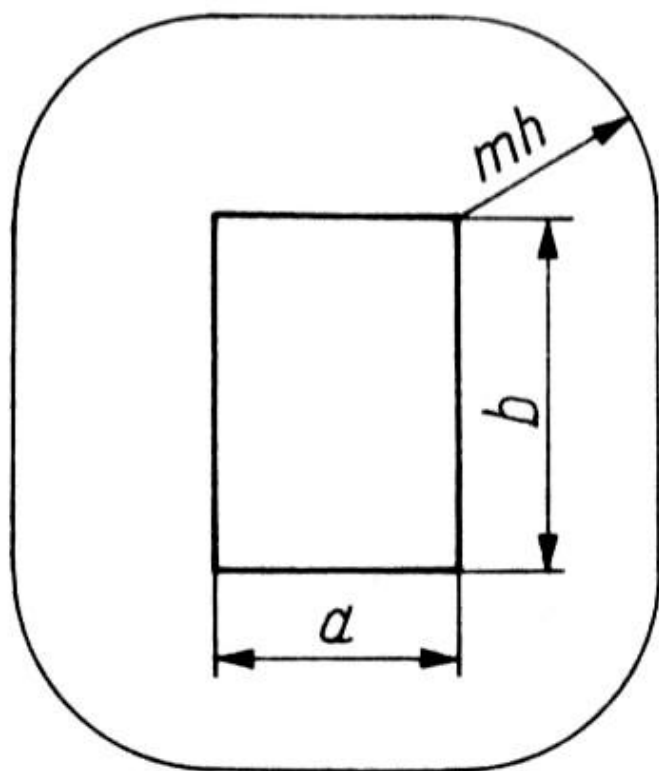
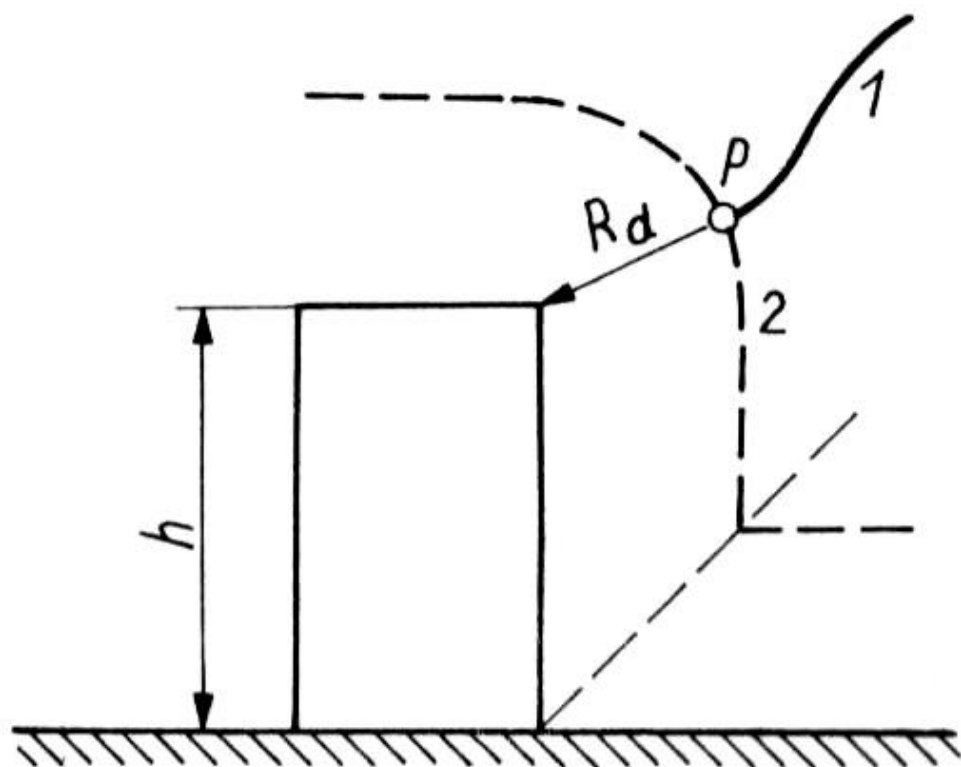
- oszacowanie powierzchni ekwiwalentnej,
- odległość decyzji  $R_d$  - odległość powierzchni decyzji od obiektu,
- dla odległości lidera pioruna  $< R_d$  - wyładowanie do obiektu,
- dla odległości lidera pioruna  $> R_d$  - wyładowanie do ziemi.





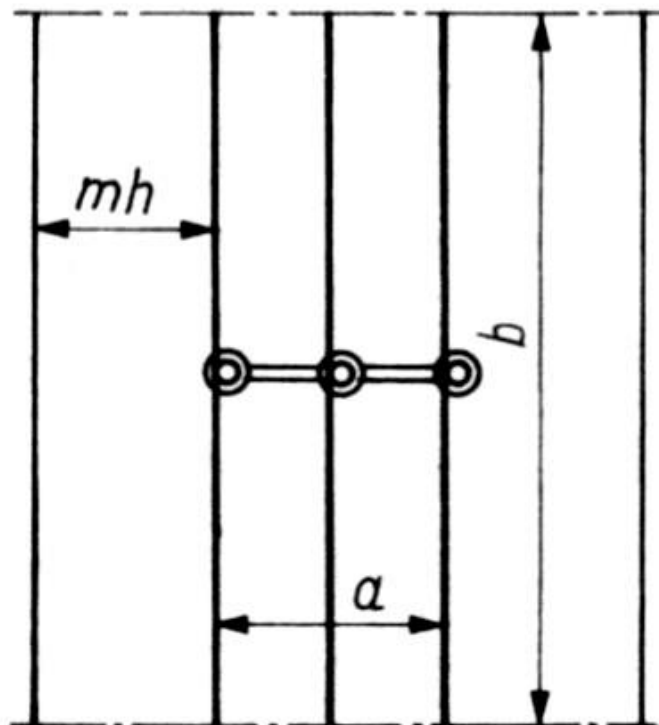
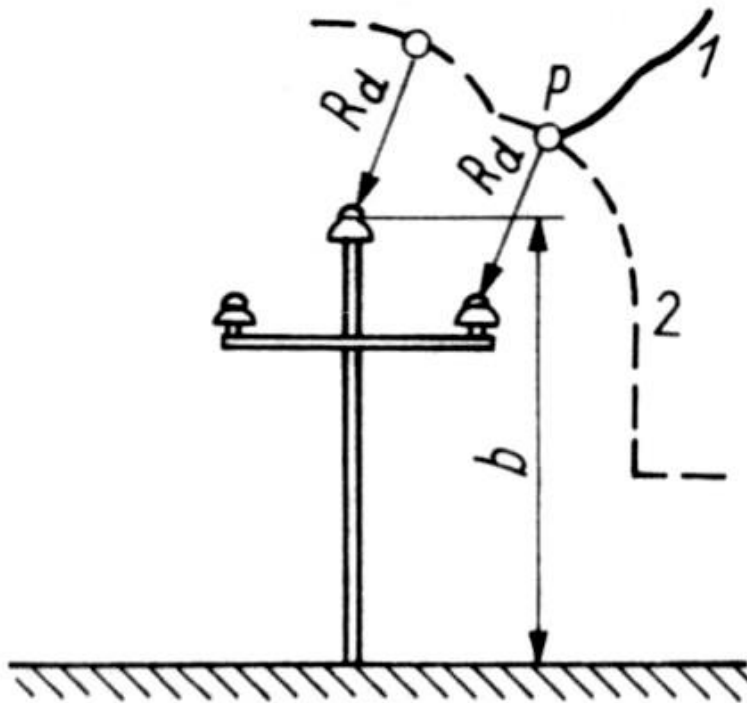
Sytuacja w chwili decyzji trafienia pioruna w pojedynczy maszt:

- 1 - lider,
- 2 - powierzchnia decyzji.



Sytuacja w chwili decyzji trafienia pioruna w obiekt trójwymiarowy:

- 1 - lider,
- 2 - powierzchnia decyzji.



Sytuacja w chwili decyzji trafienia pioruna w linię napowietrzną:

- 1 - lider,
- 2 - powierzchnia decyzji.

Odległość decyzji  $R_d$  jest funkcją prądu piorunowego.

Postać ogólna tej funkcji:

$$R_d = k \cdot I^p$$

Średnie wartości współczynników:  $k = 9,4$ ,  $p = 0,67$ , dla przeciętnej wartości prądu:  $R_d \cong 80$  m.

Przeciętny zasięg powierzchni ekwiwalentnej  $m$  zależy od wysokości obiektu  $h$ :

$$m = 13,4 h^{-0,5} \quad \text{dla } h \leq 40 \text{ m}$$

$$m = 2 \quad \text{dla } h > 40 \text{ m}$$

Przykład:

Linia o wysokości 25 m, odstępnie między przewodami skrajnymi 10 m i długości 100 km na równym terenie:

$$N_r = 1,8 \text{ km}^{-2} \cdot a^{-1}$$

Średnia roczna liczba trafień w linię  $N = 26$ .