

PRZEPIĘCIA

Wprowadzenie

Każdy wzrost napięcia w urządzeniu elektrycznym powyżej jego najwyższego napięcia roboczego jest przepięciem. Jego źródło może tkwić w samym układzie, w którym pracuje urządzenie, jak też może wynikać z oddziaływania czynników zewnętrznych.

Miarą wartości przepięć jest **współczynnik przepięć k_p** wyrażający ich amplitudę U_{pm} jako krotność amplitudy najwyższego napięcia roboczego urządzeń 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.

Wartości współczynnika przepięć zależą od rodzaju urządzeń, od rodzaju przepięć i miejsca ich występowania w układzie. Mogą się zawierać od kilkudziesięciu procent (przepięcia wewnętrzne wolnozmiennie i urządzenia najwyższych napięć) do kilkuset i więcej procent (przepięcia zewnętrzne i urządzenia niższych napięć).

Podstawowe rodzaje przebiegów

Przebiegi wewnętrzne:

- dorywcze (wolnozmiennie): $k_p = 1,1...3$:
 - ziemnozwarciowe przyczyna: trwałe zwarcie z ziemią,
 - dynamiczne przyczyna: nagłe wyłączenie obciążenia,
 - rezonansowe przyczyna: rezonans szeregowy, ferorezonans,
- łączeniowe (szybkoszmiennie): $k_p = 2...4$:
 - manewrowe przyczyna: zamierzone czynności łączeniowe,
 - awaryjne przyczyna: przerywane zwarcie z ziemią.

Przebiegi zewnętrzne (piorunowe): $k_p > 5$:

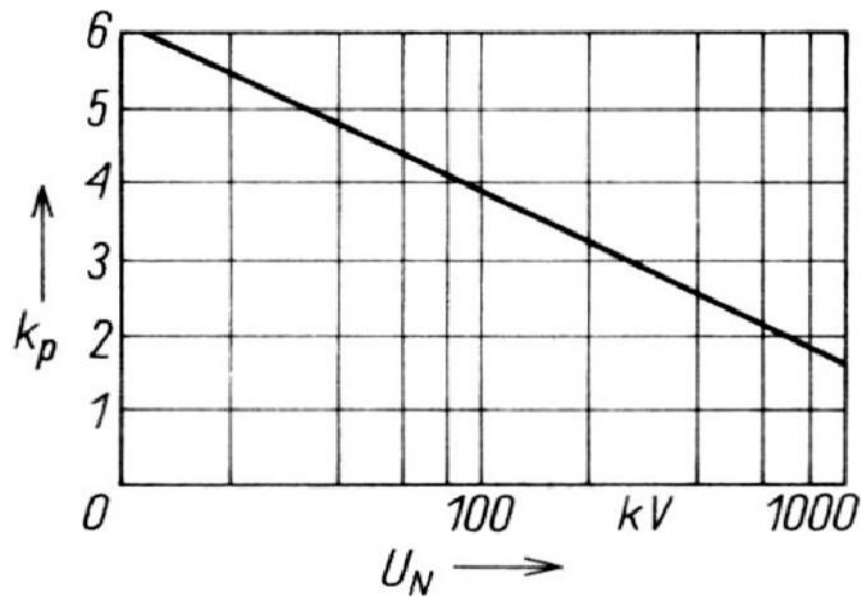
- bezpośrednie przyczyna: uderzenie pioruna w urządzenie elektryczne (części czynne i konstrukcyjne),
- indukowane przyczyna: uderzenie pioruna w pobliżu urządzenia elektrycznego.

Przebiegi czasowe przebiegów

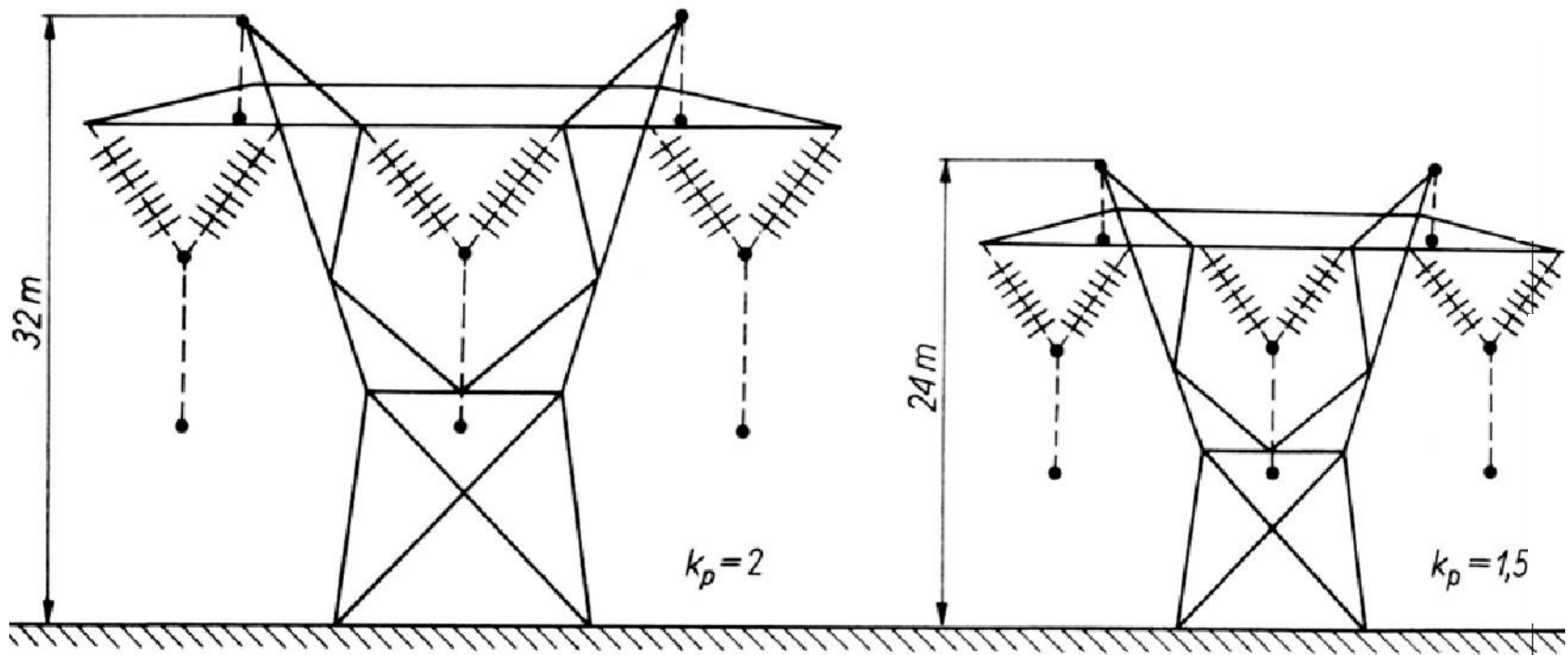
przebiegi	przebieg czasowy	czas trwania
ziemnozwarciowe, dynamiczne, rezonansowe	sinusoidalne 50 Hz	sekundy, minuty i dłużej
ferrorezonansowe	sinusoidalne 50 Hz (100 Hz, 150 Hz itp.)	sekundy, minuty i dłużej
łączeniowe	impulsowe zanikające oscylacyjnie	setki, tysiące mikrosekund
piorunowe	impulsowe zanikające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

Wytrzymałość izolacji urządzeń sieciowych na przebiegi

Współczynnik przebiegów jest wielkością, na którą można wpływać przez odpowiedni dobór wytrzymałości izolacji i środków jej ochrony. Im większe są koszty izolacji, a więc im wyższe są napięcia znamionowe urządzeń, tym bardziej musi być ograniczona wartość współczynnika przebiegów.



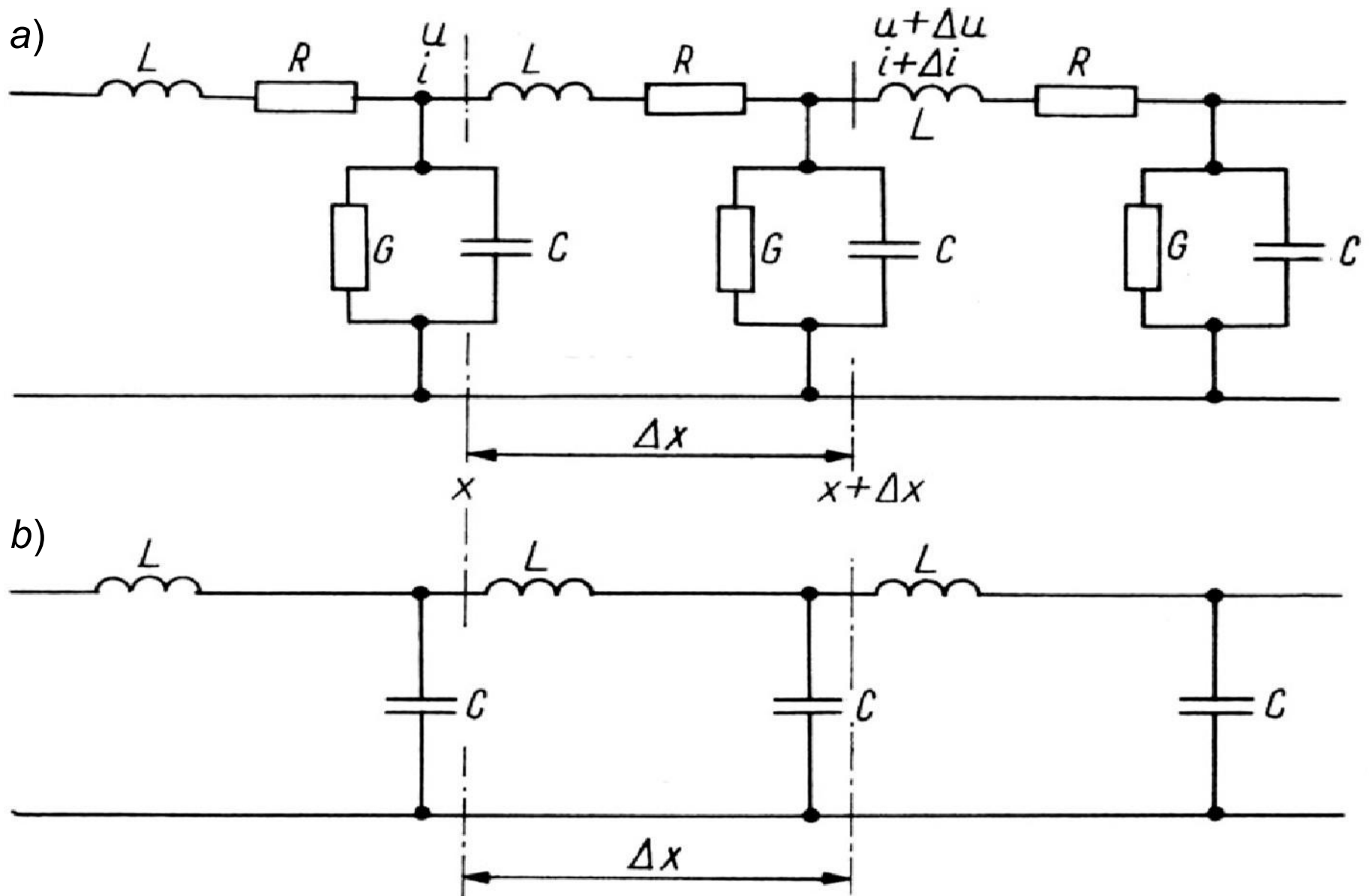
Stosowana względna wytrzymałość izolacji
doziemnej przy przepięciach łączeniowych



Wpływ współczynnika dopuszczalnych przepięć wewnętrznych
na wymiary linii.

Fale przepięciowe w liniach elektroenergetycznych

Odcinek linii z falą przepięciową stanowi układ o stałych rozłożonych, które w obliczeniach są zastępowane elementami skupionymi: wzdłużnymi (rezystancją R i indukcyjnością L) oraz poprzecznymi (konduktancją G i pojemnością C) odniesionymi do jednostki długości linii.



Schematy zastępcze odcinka linii: a) ze stratami, b) bez strat

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:

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

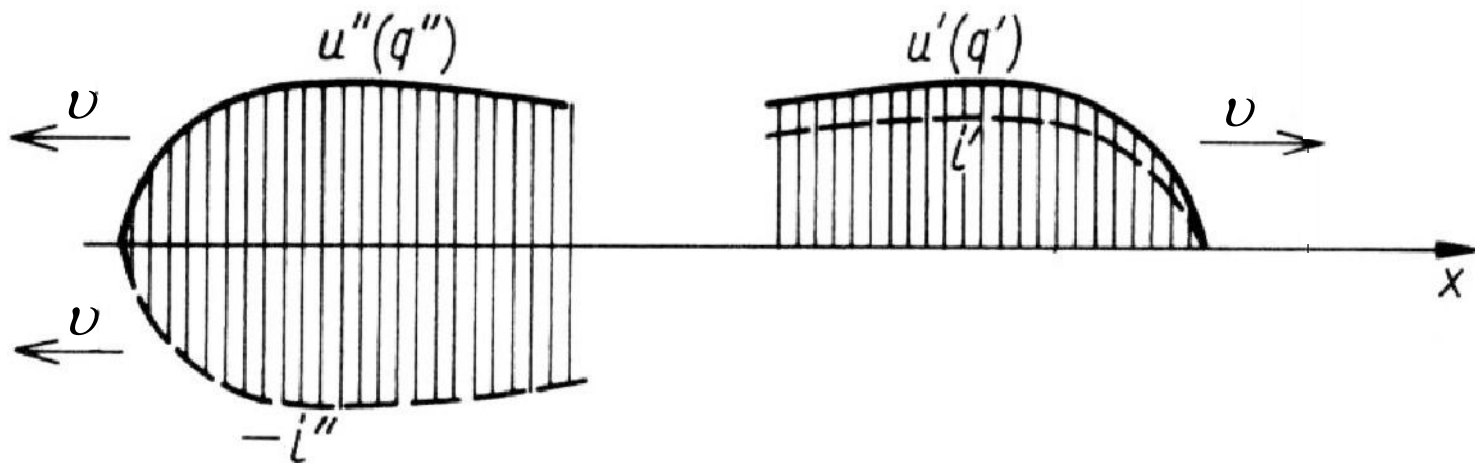
$$i''(x + vt)$$

Stosując zależności:

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

otrzymujemy:

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

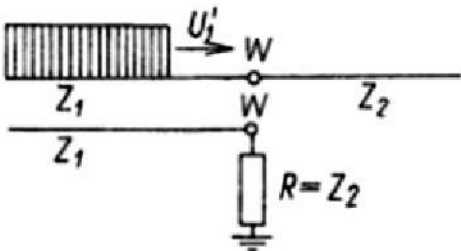
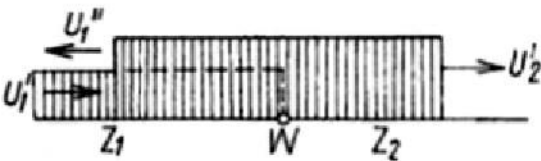
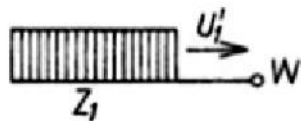
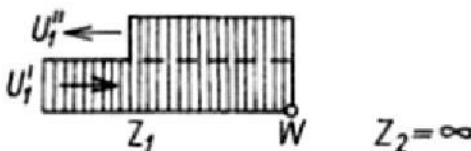
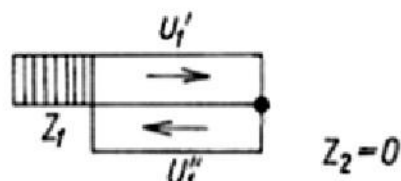
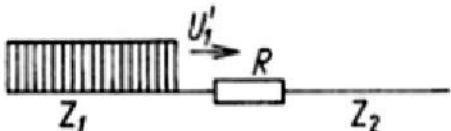
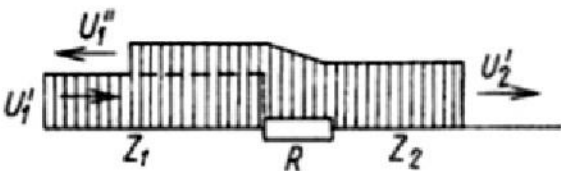
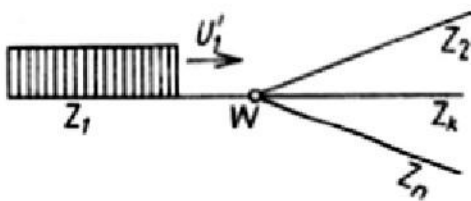
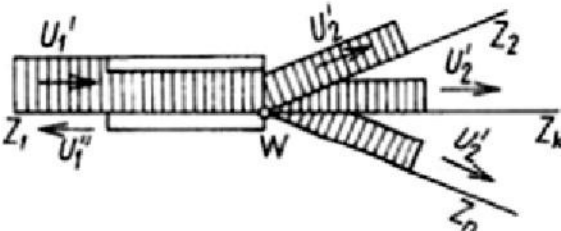


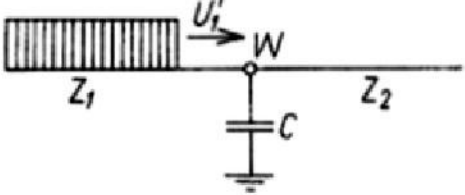
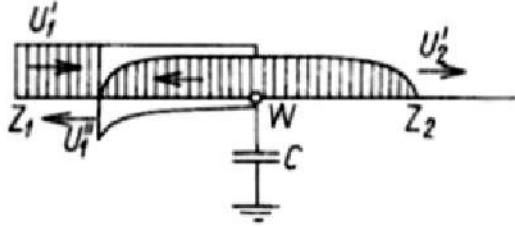
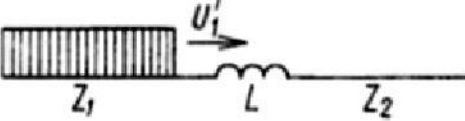
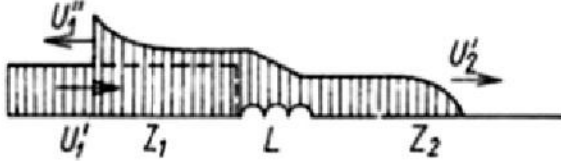
Obraz fal przepięciowych biegnących wzdłuż linii

Przejście fali przez węzeł sieci

Punkt, w którym impedancja falowa linii ulega zmianie, jest nazywany punktem nieciągłości lub węzłem. W przypadku, gdy impedancja linii za węzłem jest mniejsza niż impedancja linii z nadchodzącą falą przepięciową, to wartość tej fali po przejściu przez węzeł maleje. Oznacza to, że w stacjach, do których jest przyłączona linia kablowa lub kilka linii napowietrznych, następuje redukcja nadchodzących przepięć.

Przejście fali prostokątnej zasilanej przez węzeł

Lp.	Układ przy $t < 0$	Układ przy $t > 0$	Współczynnik przejścia fali α_∞
1	2	3	4
1			$\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{2R}{Z_1 + R}$
2			2
3			0
4			$\frac{2Z_2}{Z_1 + R + Z_2}$
5			$\frac{2}{n}$ $Z_1 = Z_2 = Z_k = Z_n$

Lp.	Układ przy $t < 0$	Układ przy $t > 0$	Współczynnik przejścia fali α_∞
1	2	3	4
6			$\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$
8			$\frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}$

Istniejące w stacji (węźle) równoległa pojemność C lub szeregową indukcyjność L działają łagodząco na czoła fal napięciowych. W przypadku fali prostokątnej jej czoło po przejściu przez taki węzeł ma znacznie zmniejszoną stromość.

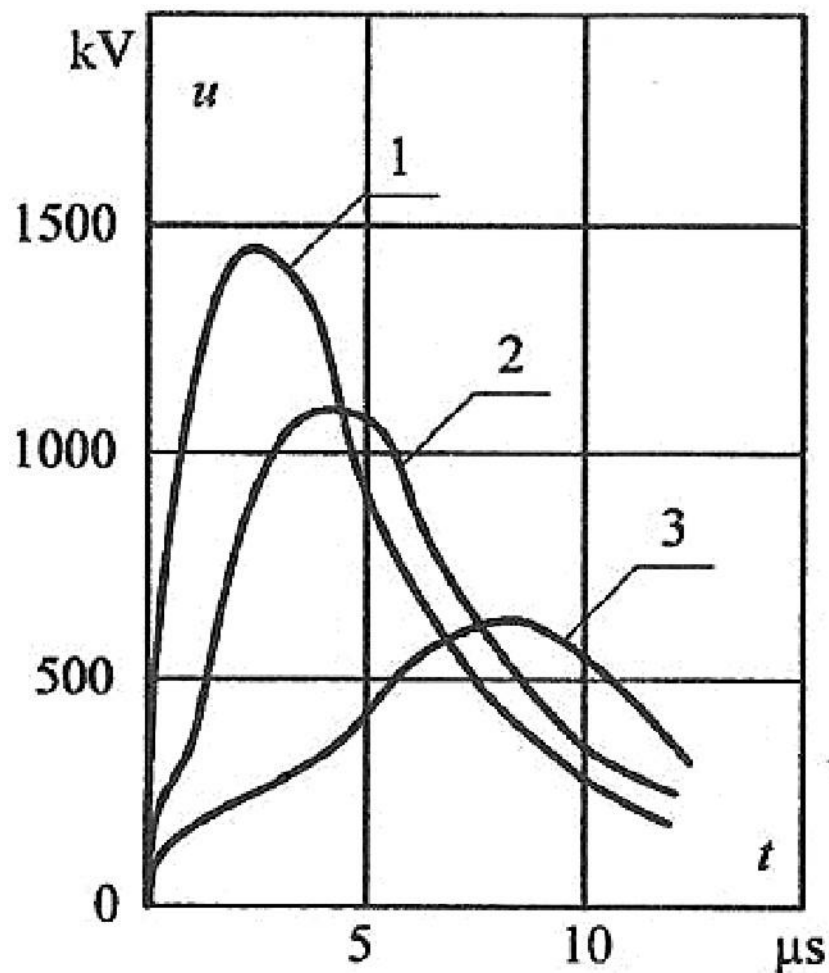
Tłumienie i odkształcanie fal przebiegowych

Tłumienie oporowe jest wywołane stratą energii w rezystancjach przewodów lub przewodów i ziemi. Rezultatem jest zmniejszenie stromości czoła i amplitudy fali przebiegowej. Przy dużych stromościach czoła istotny wpływ ma naskórkowość. Straty energii w ziemi są na ogół znacznie większe niż w przewodach.

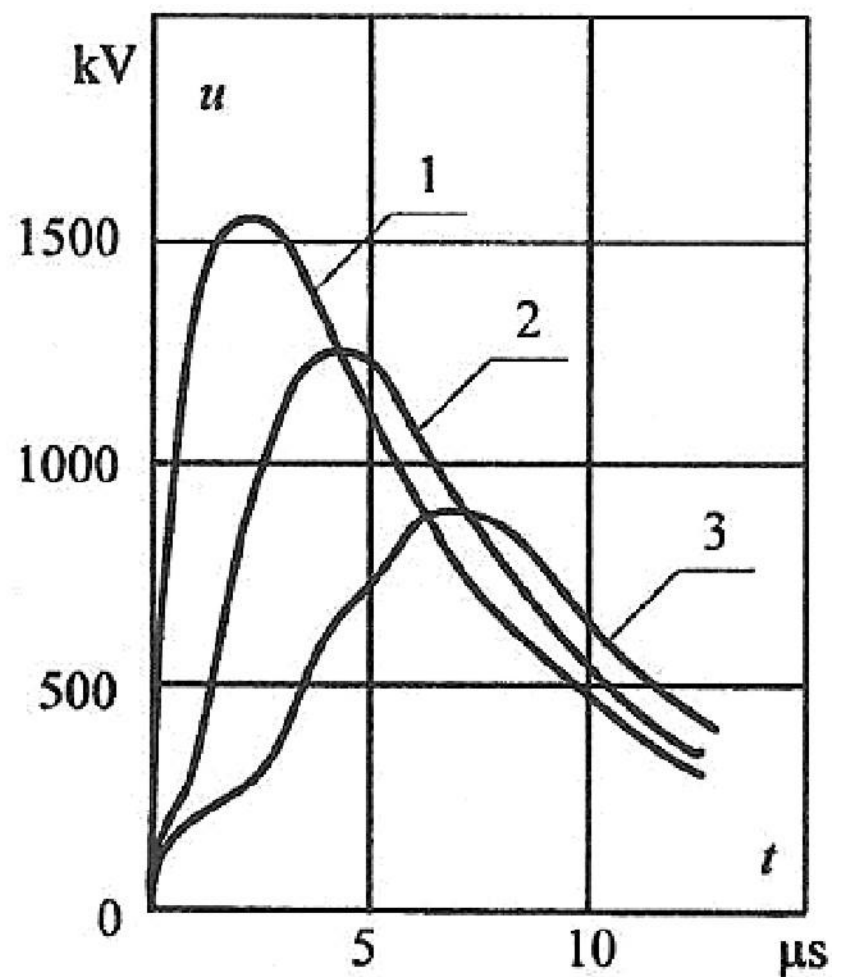
Tłumienie izolatorowe ma charakter pojemnościowy i następuje na czole fali, która ładuje pojemności izolatorów. Zmienia to kształt czoła fali, ale bez strat energii, gdyż zmagazynowany w izolatorach ładunek jest oddawany na grzbiecie fali. Grzbiet fali ulega przez to wydłużeniu.

Tłumienie ulotowe jest powodowane stratą energii, związaną z odpływem ładunków z przewodów i zmniejszeniem się prędkości części fali o wartości przekraczającej napięcie jonizacji. Strata energii jest w przybliżeniu proporcjonalna do kwadratu różnicy między napięciem fali i napięciem jonizacji, $(U_{pm} - U_j)^2$. Zależność ważna dla $U_{pm} > U_j$.

Przy dostatecznie dużym napięciu fali, przebiegnięcie przez nią nawet niewielkiej drogi może powodować znaczne zmniejszenie stromości jej czoła i wartości szczytowej.



a)



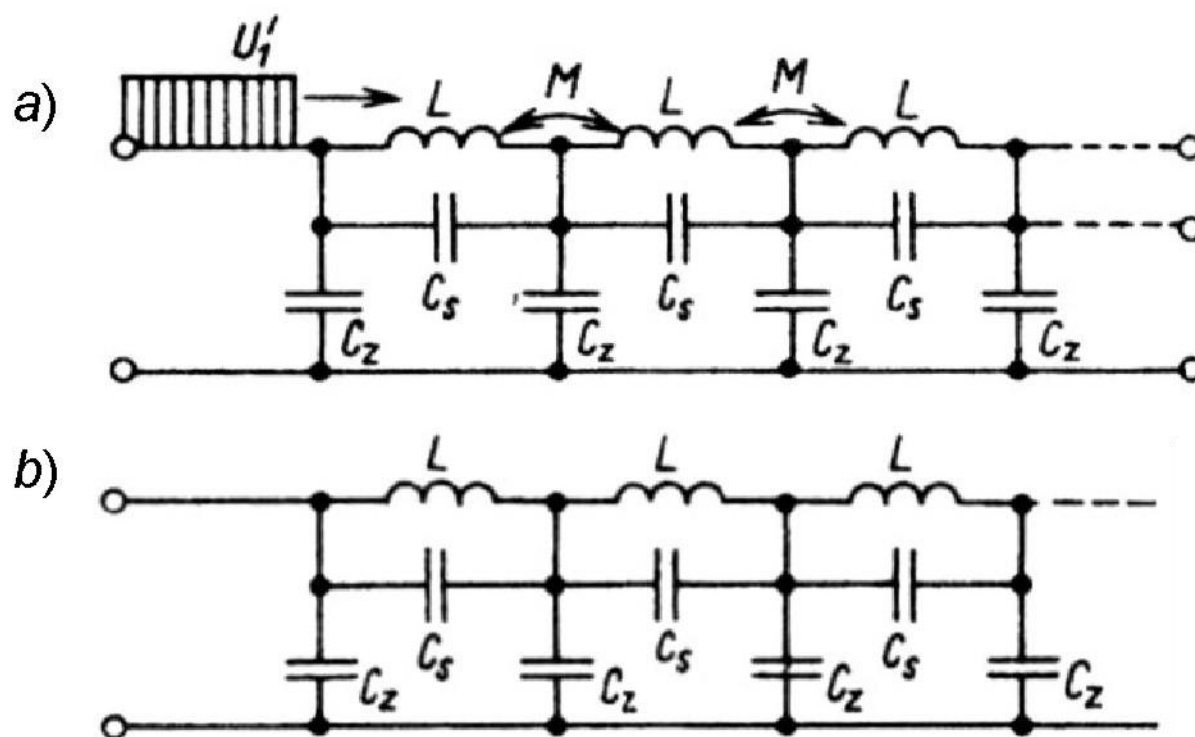
b)

Przykład tłumienia i odkształcania ulotowego fal przepięciowych w linii napowietrznej 110 kV o napięciu początkowym ulotu 100 kV; a) przebiegi fal napięciowych o biegunowości dodatniej, b) przebiegi fal napięciowych o biegunowości ujemnej;
 1 - fala początkowa,
 2 - fala po pokonaniu 1 km wzdłuż przewodu,
 3 - fala po pokonaniu 5 km wzdłuż przewodu.

Fale przepięciowe w uzwojeniach transformatorów

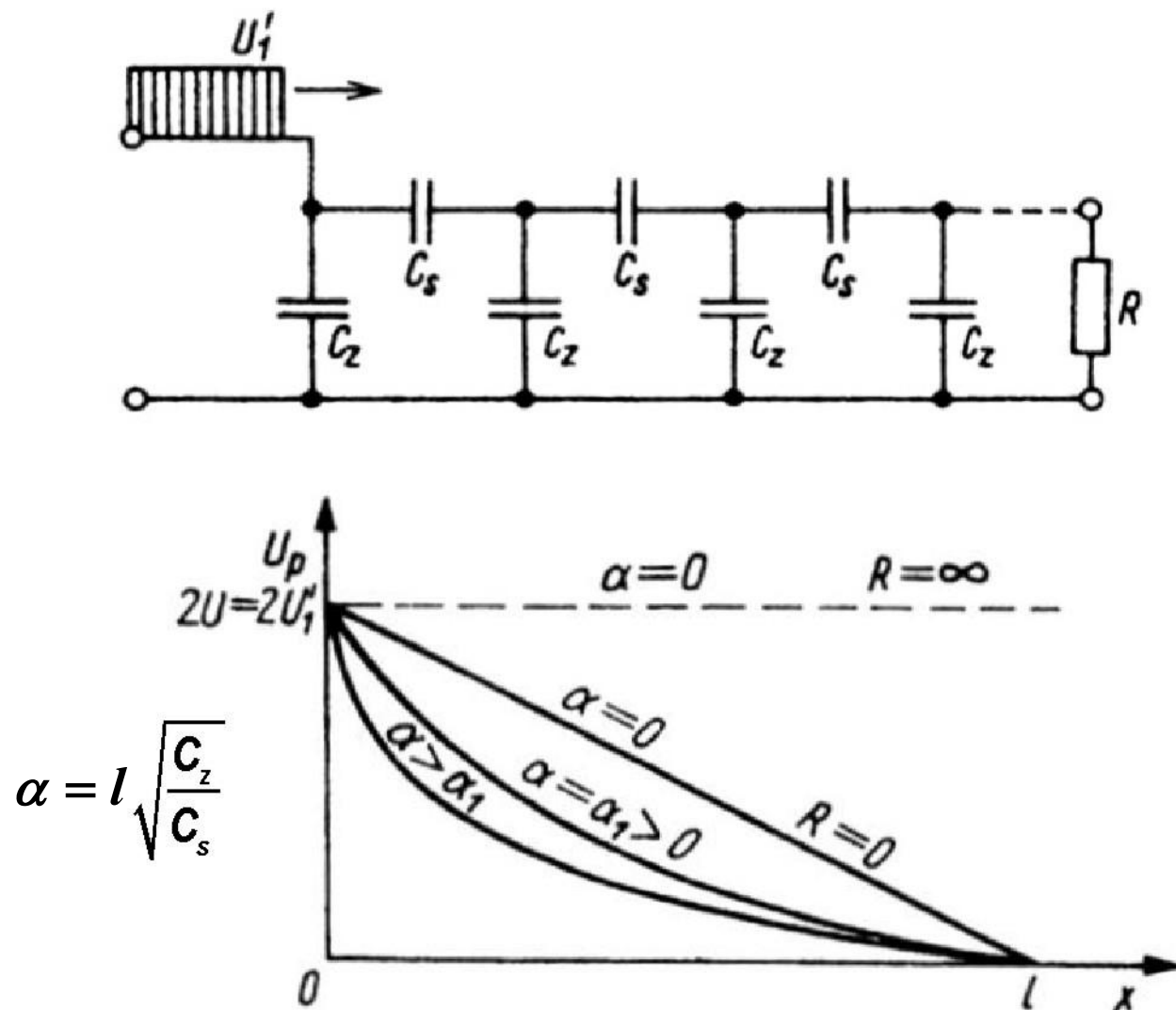
Schemat zastępczy uzwojenia transformatora, do którego wchodzi fala przepięciowa, jest bardziej złożony niż schemat linii długiej. Oprócz indukcyjności podłużnych L i pojemności poprzecznych C_z , występują sprzężenia indukcyjne M i pojemnościowe C_s , między zwojami i cewkami uzwojeń. Sprzężenia M są mniej znaczące i w uproszczonym ujęciu przebiegów napięciowych mogą być pominięte, natomiast rola sprzężeń C_s jest istotna i muszą być uwzględnione.

Po dotarciu fali przepięciowej prostokątnej do takiego uzwojenia występują w nim drgania, w przebiegu których można wyróżnić trzy stany: początkowy, przejściowy i końcowy.



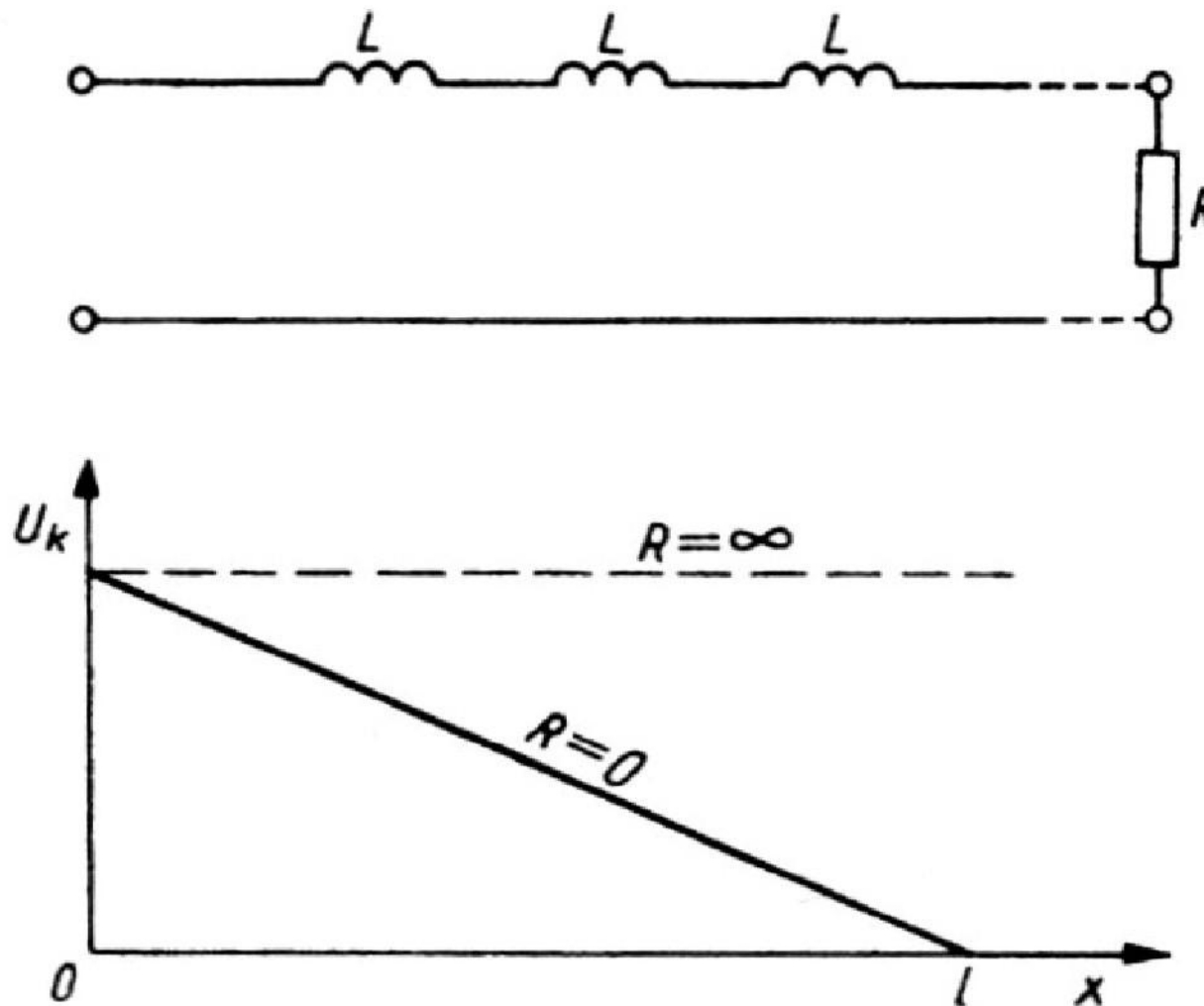
Schematy uzwojeń transformatora: a) z uwzględnieniem sprzężeń międzycewkowych, b) uproszczony

W stanie początkowym ($t = 0$) indukcyjności L są odczuwane przez falę o stromym czole jako przerwy w układzie, który w rezultacie zachowuje się jak układ złożony tylko z pojemności szeregowych C_s i równoległych doziemnych C_z . Na rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia ma wpływ wartość współczynnika α oraz stan, w jakim znajduje się koniec uzwojenia.



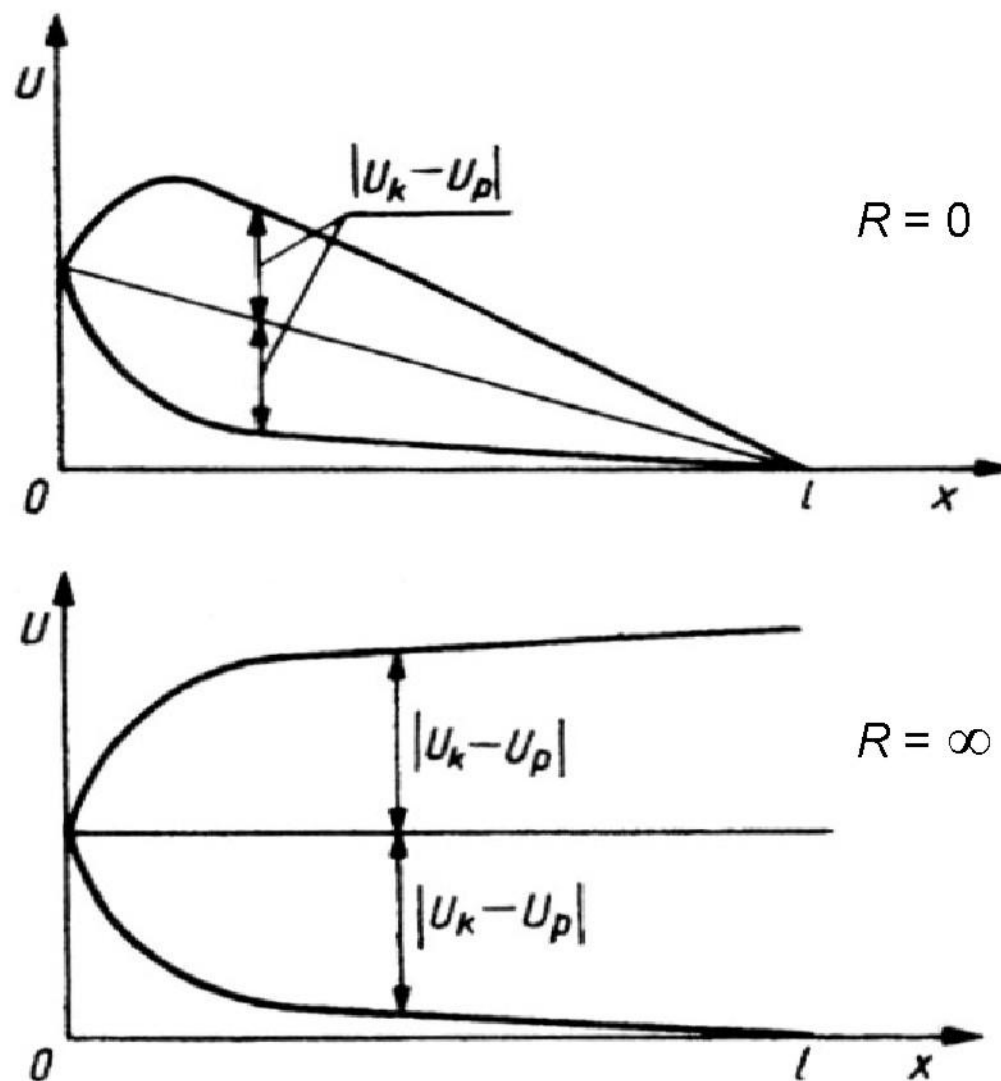
Schemat i rozkład początkowy fali przepięciowej w uzwojeniu transformatora

W stanie końcowym ($t \rightarrow \infty$) wpływ pojemności C_s i C_z ustaje i układ przekształca się do (przedstawionej niżej) postaci. Rozkład napięcia wzdłuż uzwojenia przechodzi w rozkład liniowy.



Schemat i rozkład końcowy fali przepięciowej w uzwojeniu transformatora

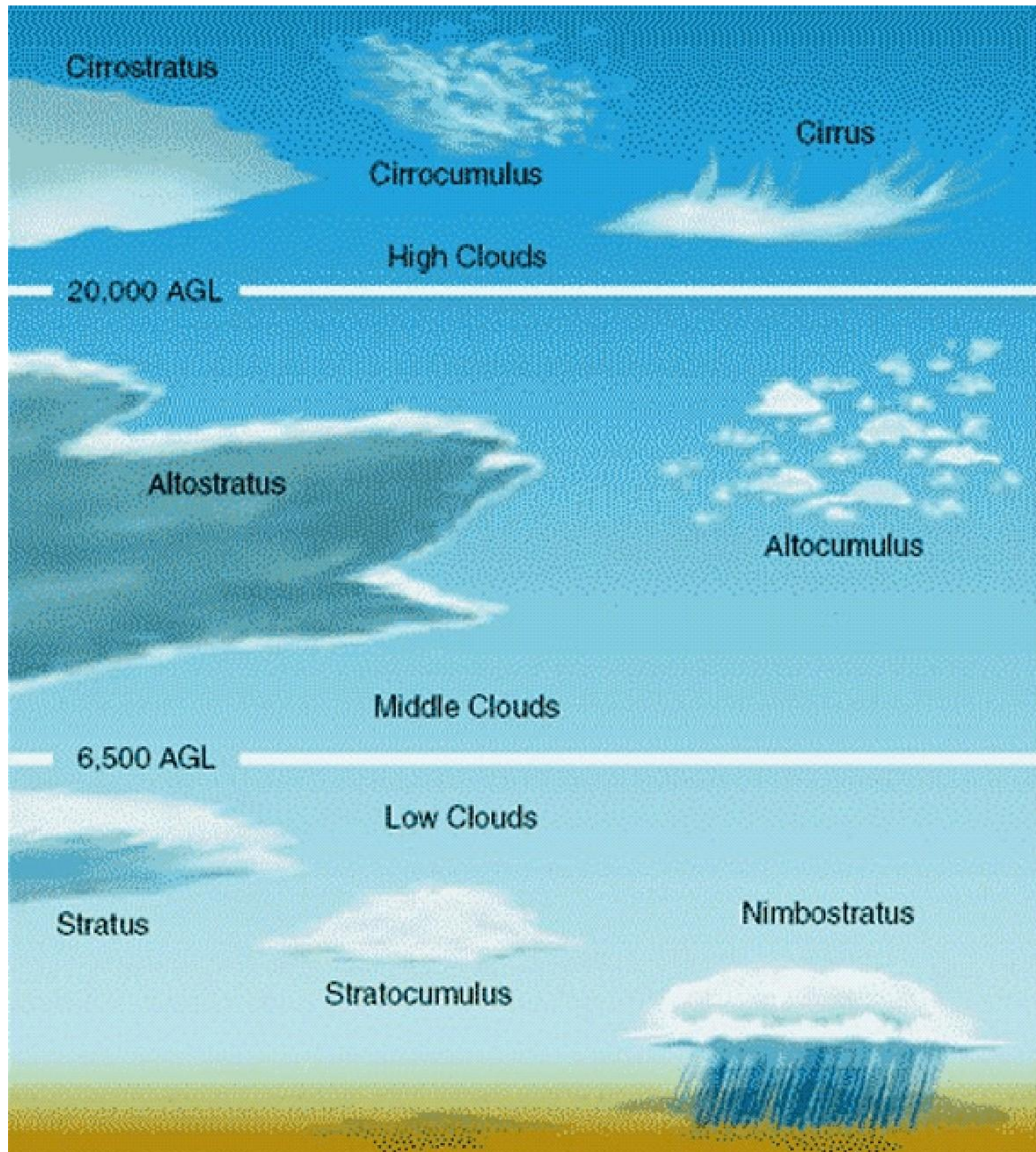
W stanie przejściowym między stanem początkowym ($t = 0$) i stanem końcowym ($t \rightarrow \infty$) występują w uzwojeniu drgania, których amplituda zależy od różnicy napięć rozkładu początkowego i końcowego. Obwiednie maksymalnych wartości napięcia, odpowiadające w przybliżeniu tej różnicy, zostały przedstawione niżej dla końców uzwojenia zwartego ($R = 0$) i otwartego ($R = \infty$).



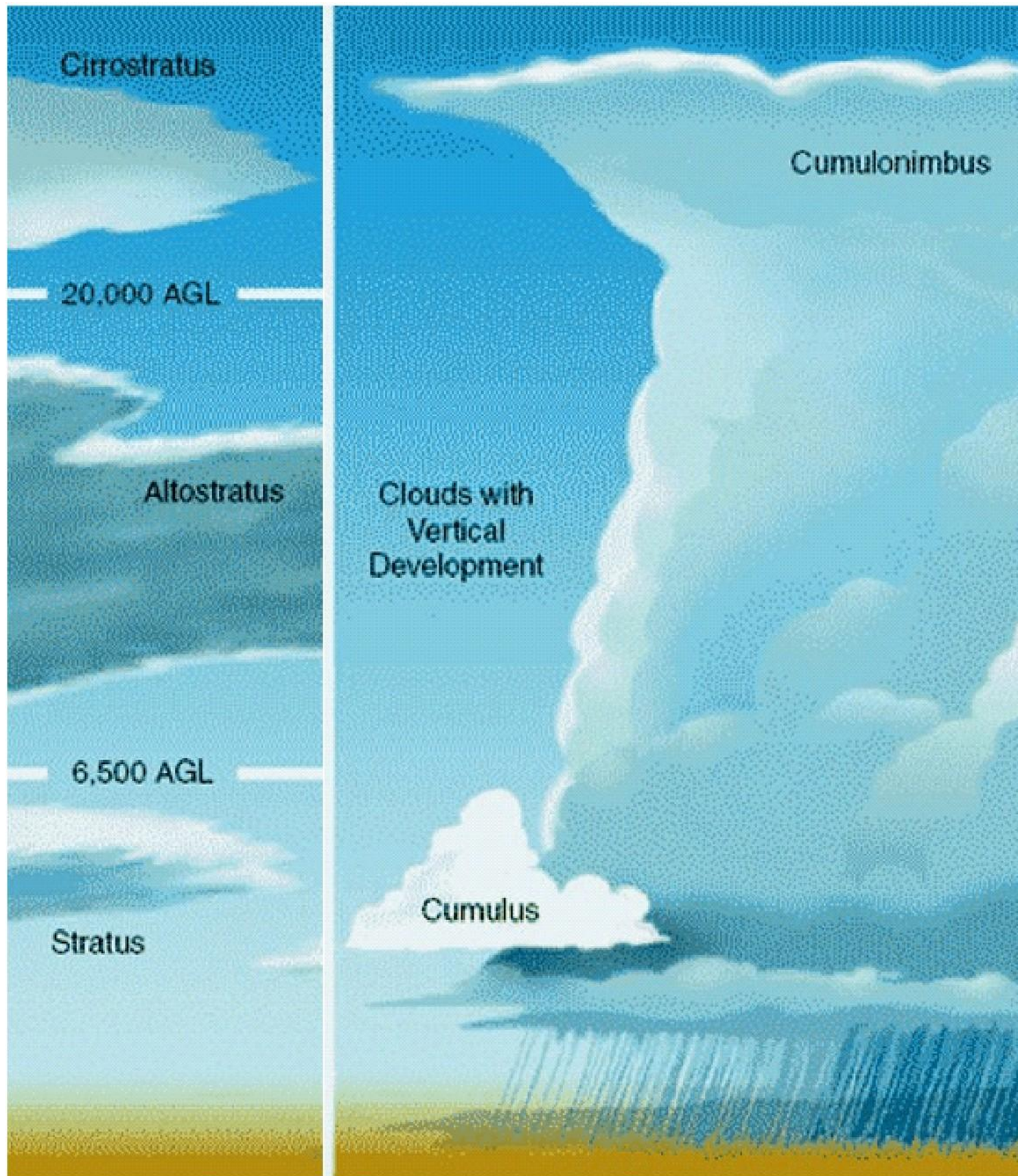
Rozkład przejściowy fali przepięciowej w uzwojeniu transformatora, obwiednie drgań

Przebiecia atmosferyczne

Chmury



Chmura burzowa - cumulonimbus





Rozwinięty
cumulonimbus



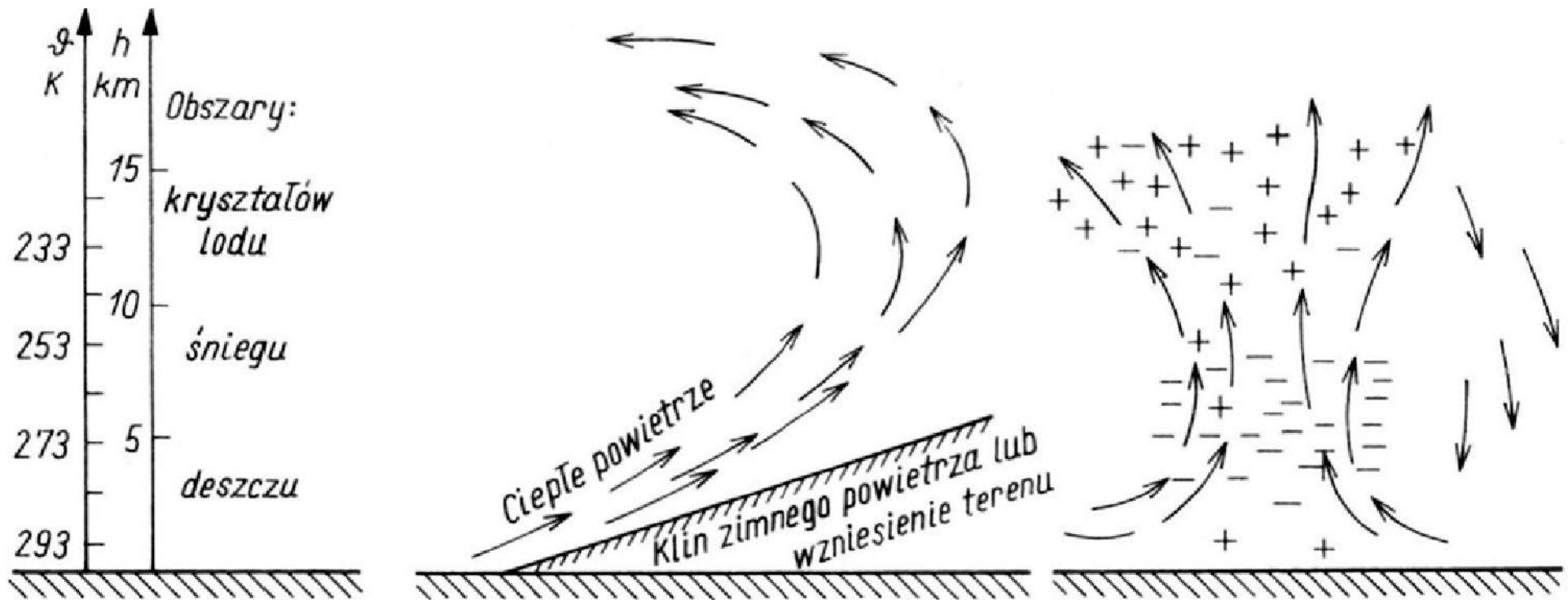
Czoło burzy
frontowej

Burze piorunowe

Wyładowania atmosferyczne wiążą się z istnieniem burz piorunowych. Rozróżnia się dwa ich podstawowe rodzaje: burze frontowe (czołowe) i burze termiczne.

Burze frontowe powstają w klimacie umiarkowanym na granicy zderzających się mas ciepłego i zimnego powietrza lub ciepłego powietrza z pochyłościami terenu. Wilgotne, ciepłe powietrze jest unoszone na duże wysokości, gdzie ulega schłodzeniu, dając początek rozległej chmurze burzowej. Może ona obejmować setki kilometrów i przemieszczać się z prędkością zwykle większą niż $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Towarzyszy jej nieduża częstość wyładowań atmosferycznych.

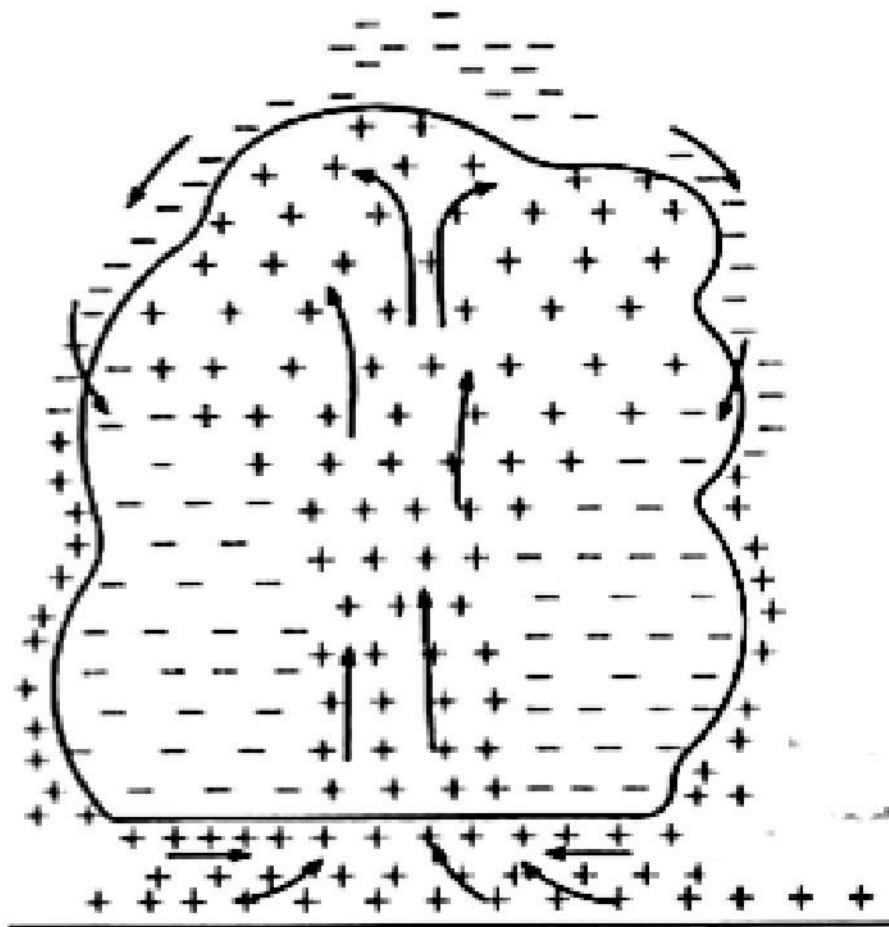
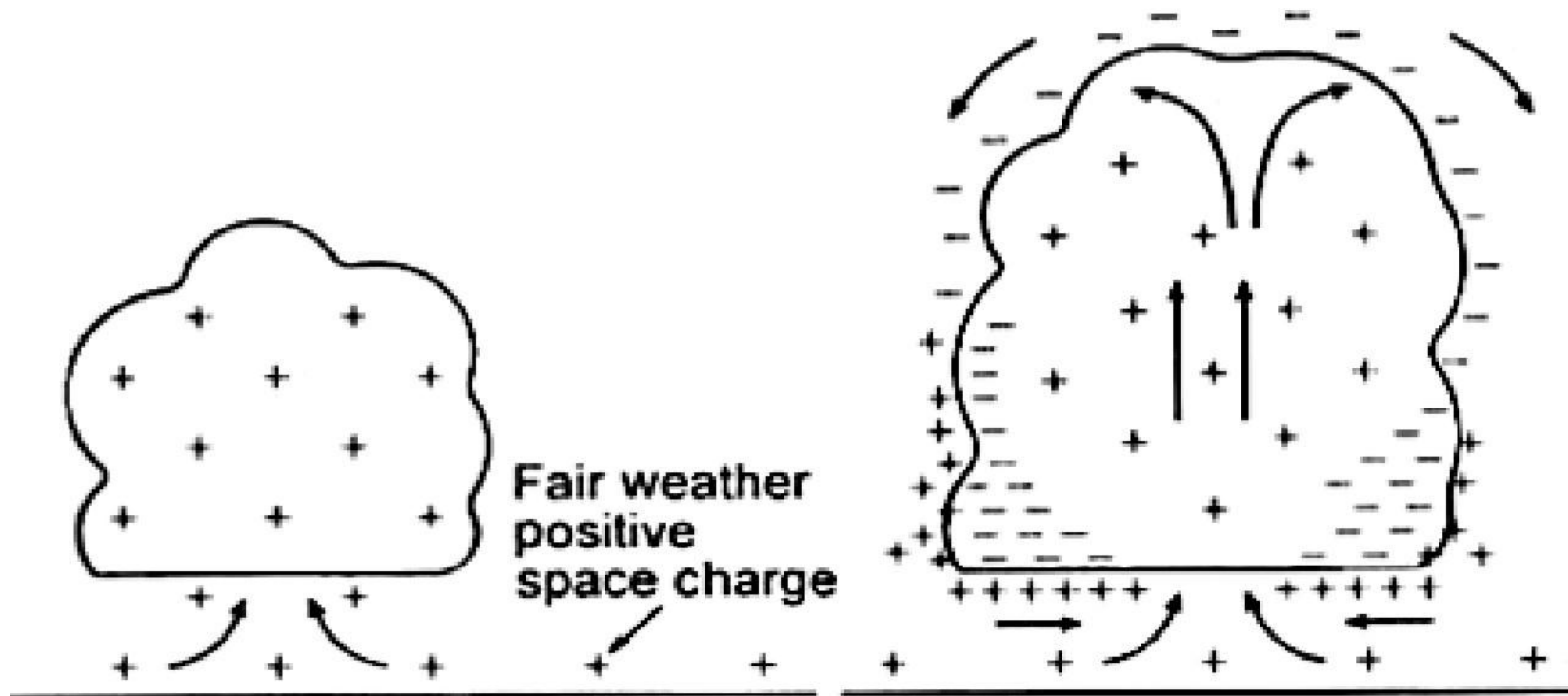
Burze termiczne charakteryzują się większą intensywnością wyładowań piorunowych niż burze frontowe. Powstają pod wpływem silnego nagrzania i unoszenia dolnych mas wilgotnego powietrza ku górze z zawirowaniami, na wysokość do 15 km, gdzie następuje jego ochłodzenie do ok. -40°C . Tworzące się kropelki wody ulegają zamarzaniu. W procesach tych formuje się naelektryzowana chmura burzowa - cumulonimbus, której ładunek tworzy dodatnie i ujemne centra o średniej gęstości rzędu $10^{-9} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$.



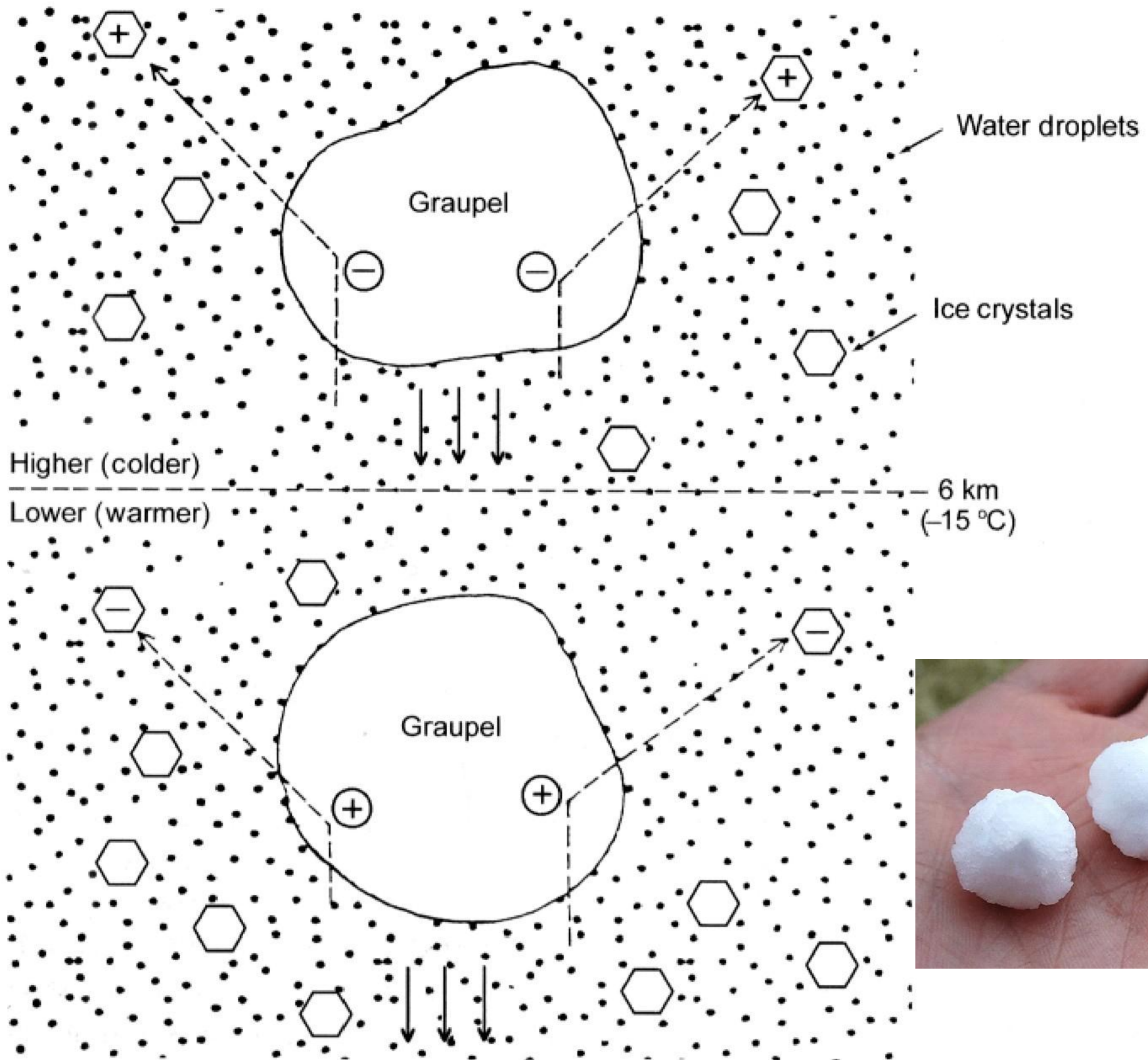
Szkic powstawania chmur burzowych: burzy frontowej i burzy termicznej

Mechanizm elektryzacji chmury burzowej jest bardzo złożony. Próbuja go wyjaśniać liczne teorie. Obecnie największym zainteresowaniem cieszą się dwie z nich:

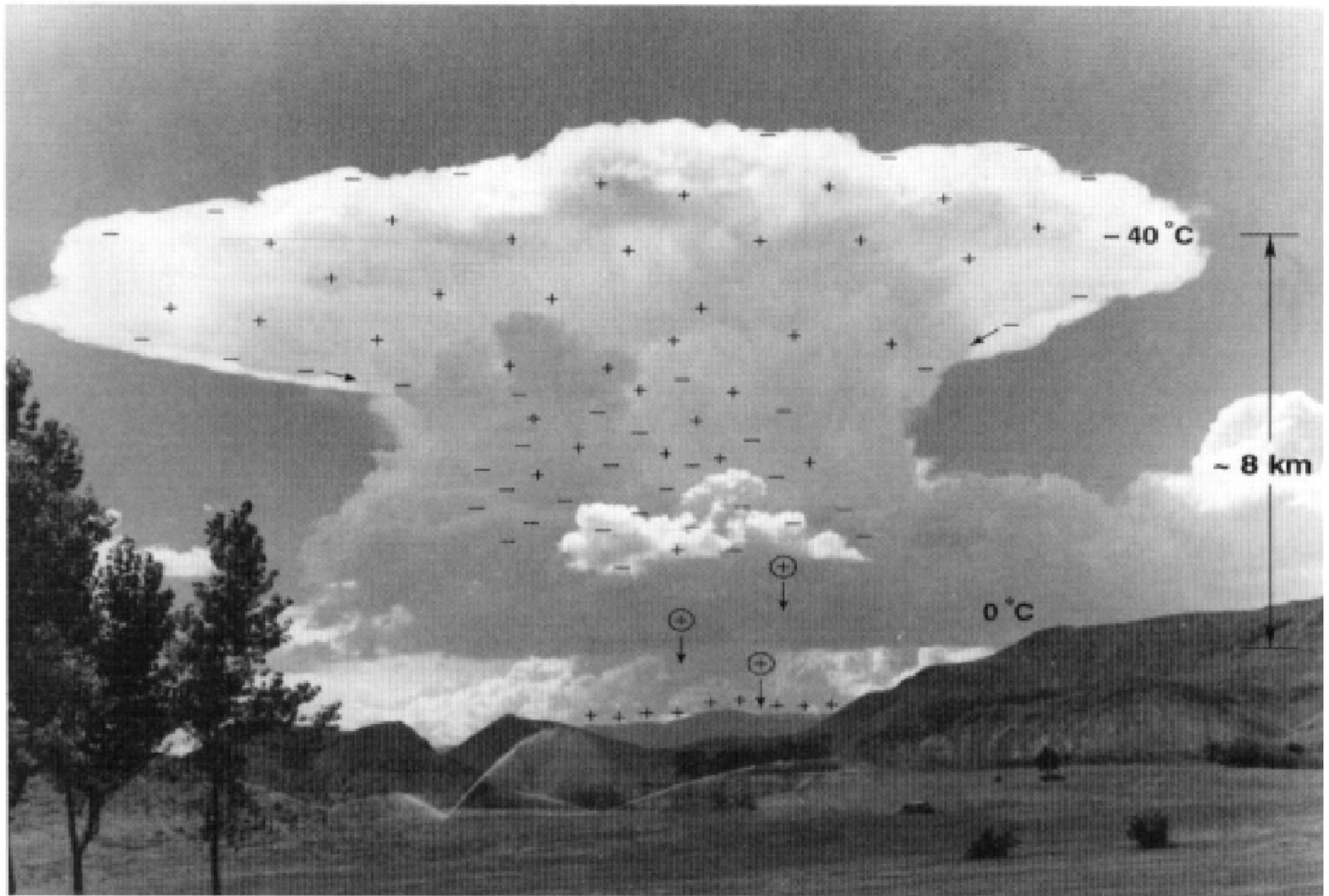
- mechanizm konwekcyjny – opisujący przenoszenie ładunku dodatniego do górnej części chmury przez wstępujący prąd powietrza oraz przenoszenie ładunku ujemnego do dolnej części chmury przez prąd zstępujący;
- mechanizm krupy śnieżnej – opisujący przenoszenie ładunku ujemnego do dolnej części chmury przez opadającą krupę śnieżną i pozostawienie ładunku dodatniego w jej górnej części.



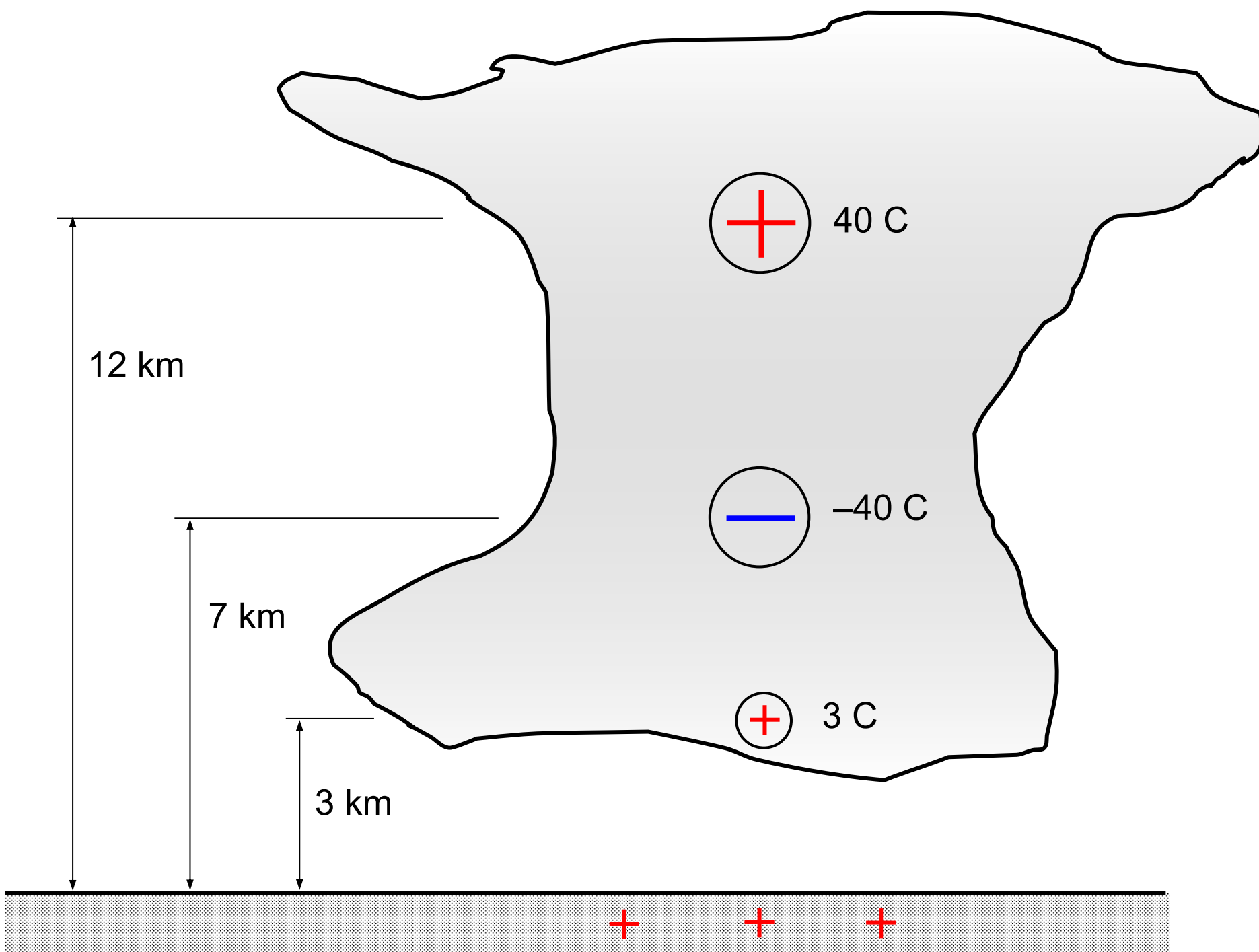
Szkic mechanizmu
konwekcyjnego elektryzacji
chmury burzowej



Szkic mechanizmu elektryzacji chmury burzowej przez krupę śnieżną



Rozkład ładunku elektrycznego w chmurze burzowej



Schemat rozmieszczenia ładunków elektrycznych w chmurze burzowej

Z dotychczasowych badań wynika, że:

- chmura burzowa tworzy tzw. komorę czynną lub może składać się z kilku takich komór o zasięgu kilku kilometrów i o średniej aktywności około 30 min, tak więc łączny czas trwania burzy może przedłużać się do kilku godzin;
- ładunek przestrzenny nagromadzony w komorze czynnej dzieli się na ładunek górny z przewagą dodatniego i dolny z przewagą ujemnego, a jego wartość może osiągać $10^3 \text{ A}\cdot\text{s}$;
- ładunek przestrzenny, zwłaszcza ujemny, o wartości od ułamka do kilkudziesięciu amperosekund tworzy oddzielne centra, których liczba może dochodzić do kilkudziesięciu;
- natężenie pola elektrycznego pod komorą czynną wynosi około $0,1 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$.

Gdy natężenie pola elektrycznego w komorze czynnej przekroczy lokalnie wartość $1 \text{ kV}\cdot\text{cm}^{-1}$, z kropel deszczu lub z kryształów lodu zaczynają się rozwijać wyładowania strimerowe i liderowe, które dają początek kanałowi wyładowania piorunowego. Kanał piorunowy rozwija się skokowo w kierunku innej chmury z ładunkiem przestrzennym przeciwnej biegunowości, tworząc wyładowanie międzychmurowe (w około 60% przypadków) lub w kierunku ziemi, tworząc wyładowanie piorunowe doziemne (odgórne).

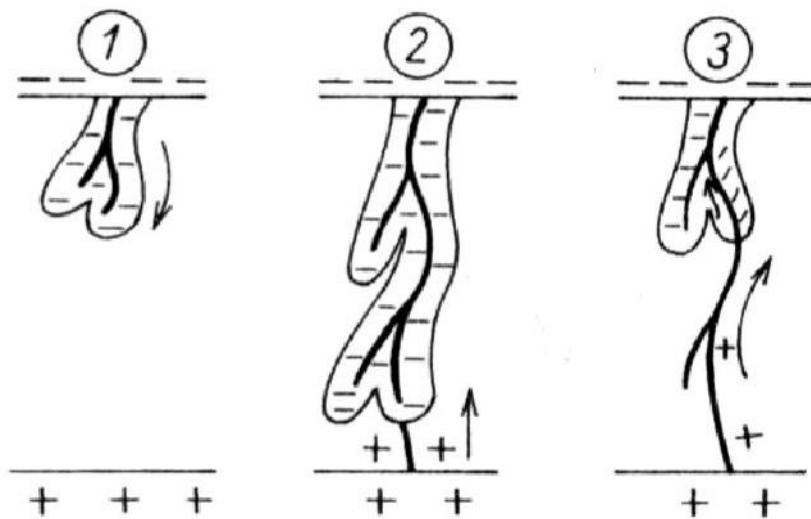
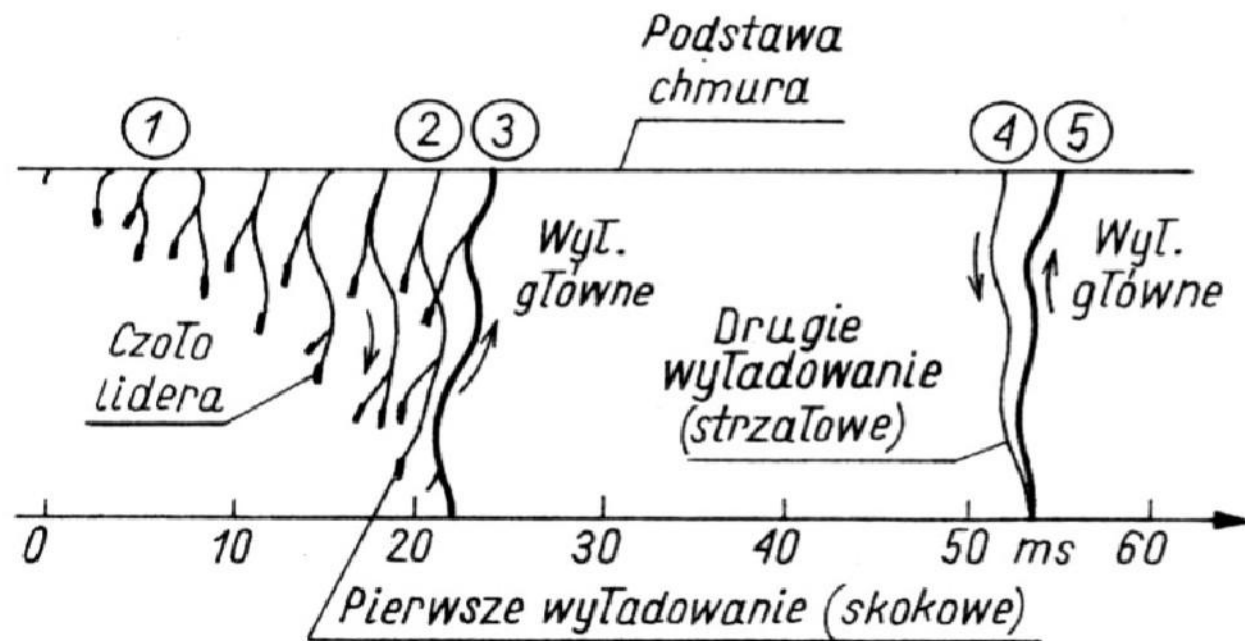
Wyładowanie wstępne, zapoczątkowane liderem w centrum ładunku ujemnego chmury burzowej, rozwija się skokowo wzdłuż linii łamanej z rozgałęzieniami w kierunku ziemi. Czoło lidera postępuje z prędkością rzędu $10^{-1} \text{ m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$. Długość skoku wynosi 10...100 m.

W czasie przemieszczania się lidera wzdłuż drogi utworzonej przez cienki (kilkumilimetrowy) silnie zjonizowany kanał plazmowy zostaje rozłożony ujemny ładunek w promieniu do 10 m.

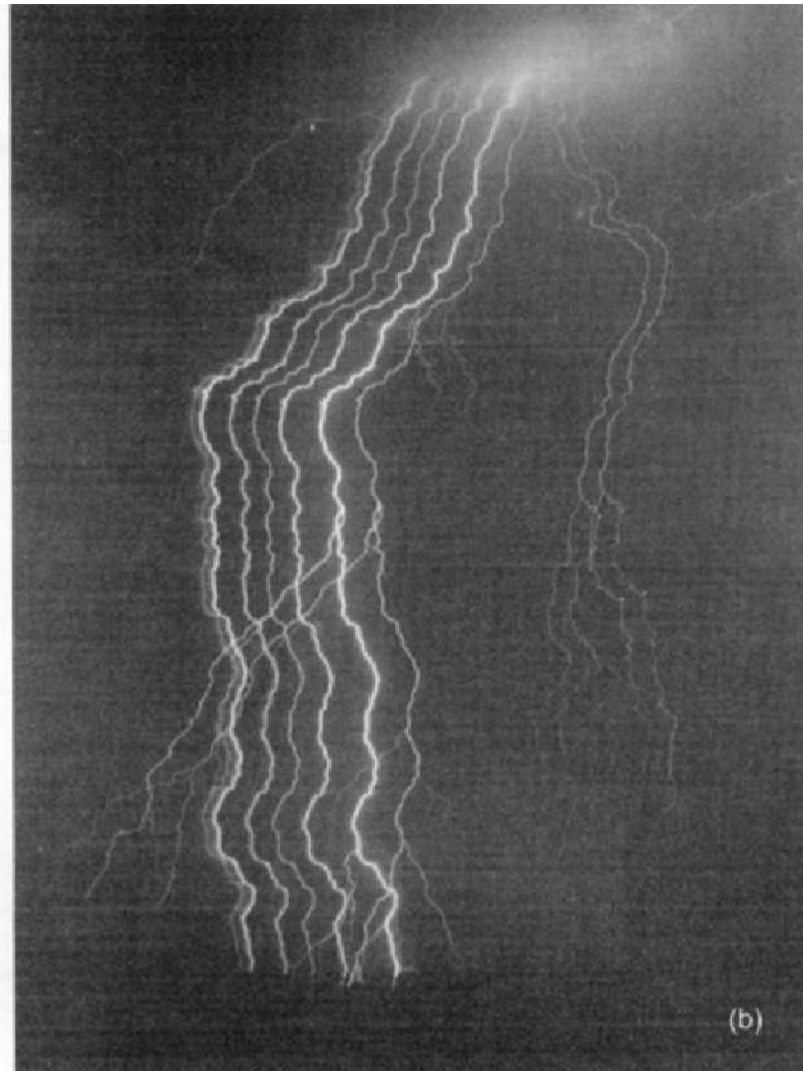
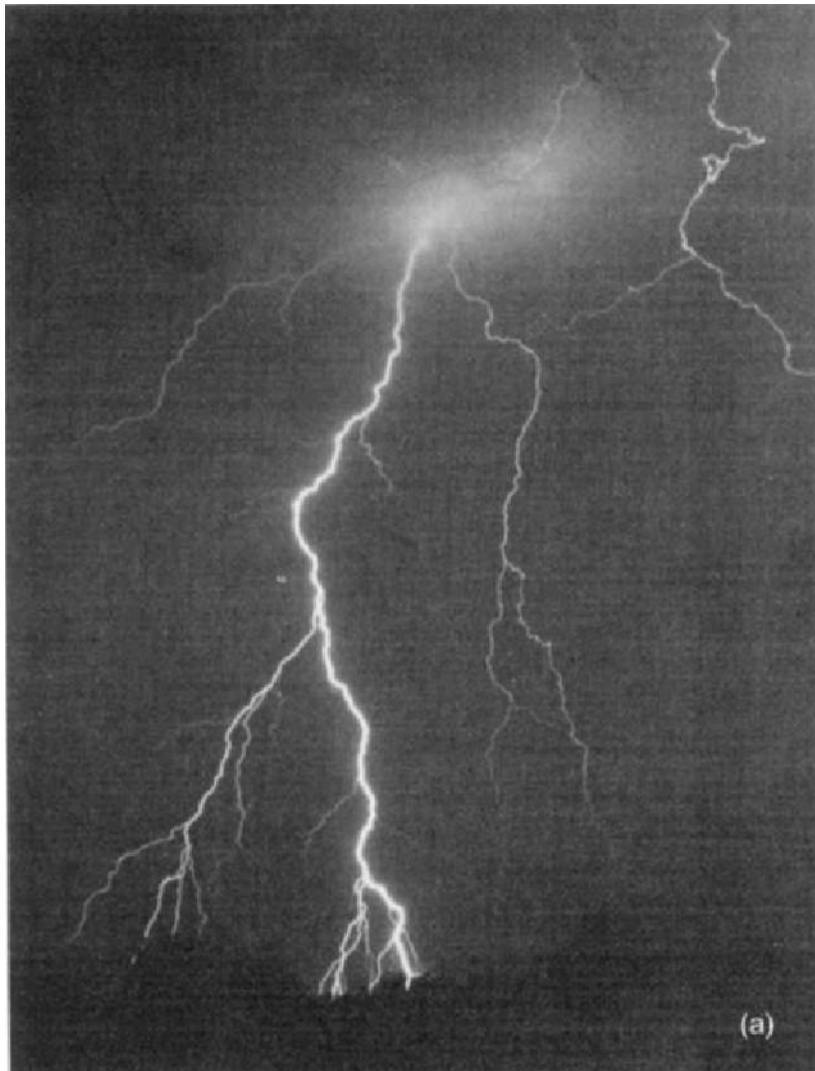
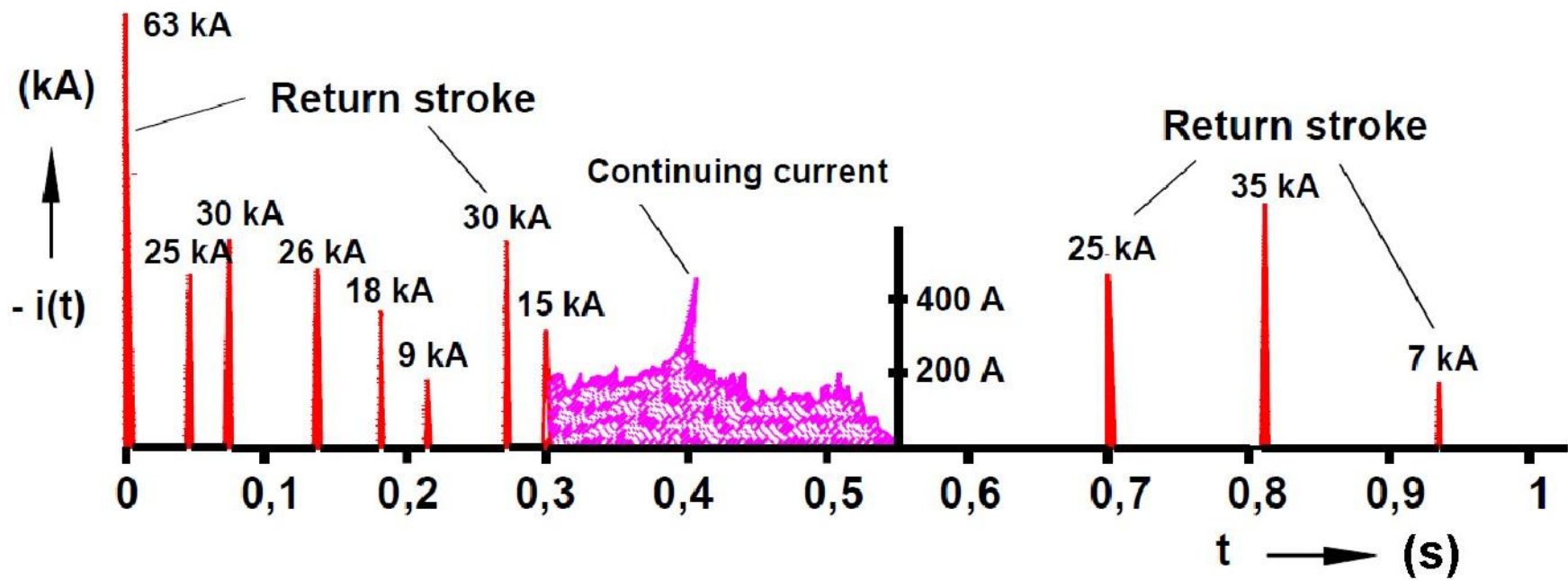
Z przemieszczaniem się ładunku jest związany prąd o wartości rzędu 100 A. W końcowej fazie rozwoju wyładowania, w miejscu prawdopodobnego uderzenia pioruna zjawia się lider oddolny, który łączy się z liderem odgórnym.

Rozpoczyna się wielkoprądowe wyładowanie główne, przebiegające w górę kanału z początkową prędkością rzędu $100 \text{ m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$, ale z tendencją do zmniejszania się w miarę upływu czasu, dlatego średnia prędkość jest szacowana na ok. $30 \text{ m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$.

Prąd wyładowania głównego narasta w czasie kilku mikrosekund (ze rosnącą stromością) do wartości maksymalnej wynoszącej kilkadziesiąt kiloamperów, a następnie maleje w przybliżeniu wykładniczo, osiągając połowę wartości maksymalnej po czasie kilkudziesięciu mikrosekund.



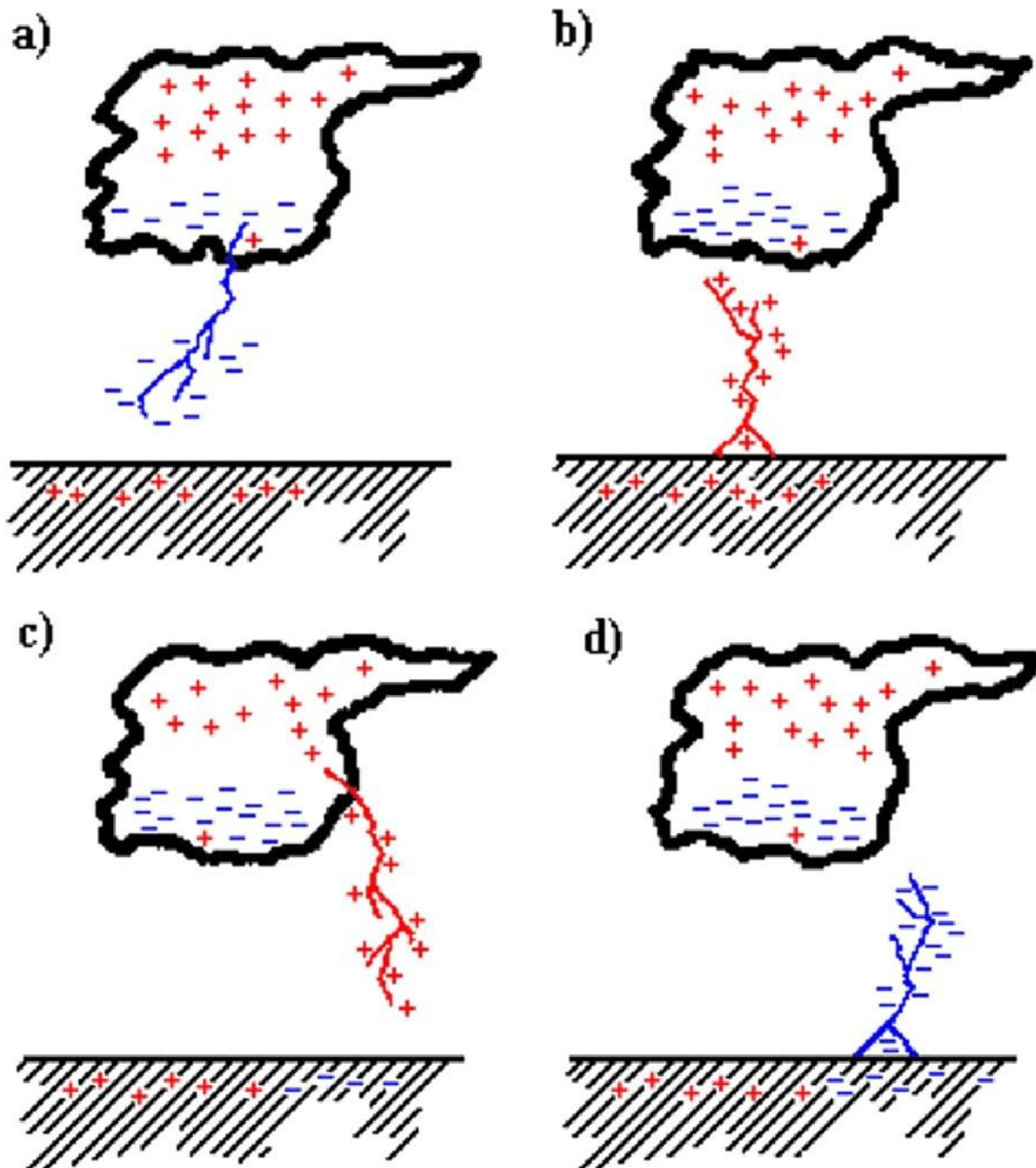
Istnienie wielu centrów ładunku w chmurze burzowej sprawia, że po pierwszym wyładowaniu głównym, w odstępach kilkudziesięciu milisekund, następują wyładowania składowe: strzałowe wyładowania wstępne i kolejne wyładowania główne. Odsetek wyładowań wielokrotnych wynosi około 80 %. Maksymalna liczba wyładowań składowych w wyładowaniu wielokrotnym wynosi 40...50, natomiast liczba przeciętna jest szacowana na 3...4.



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

Typy wyładowań piorunowych

Podział wyładowań jest dokonywany nie tylko ze względu na kierunek ich rozwoju (odgórne i oddolne), ale również ze względu na biegunowość ładunku ($\pm$) w miejscu zapoczątkowania wyładowania, co daje 4 typy wyładowań. Każde z tych wyładowań może być zupełne lub niezupełne.



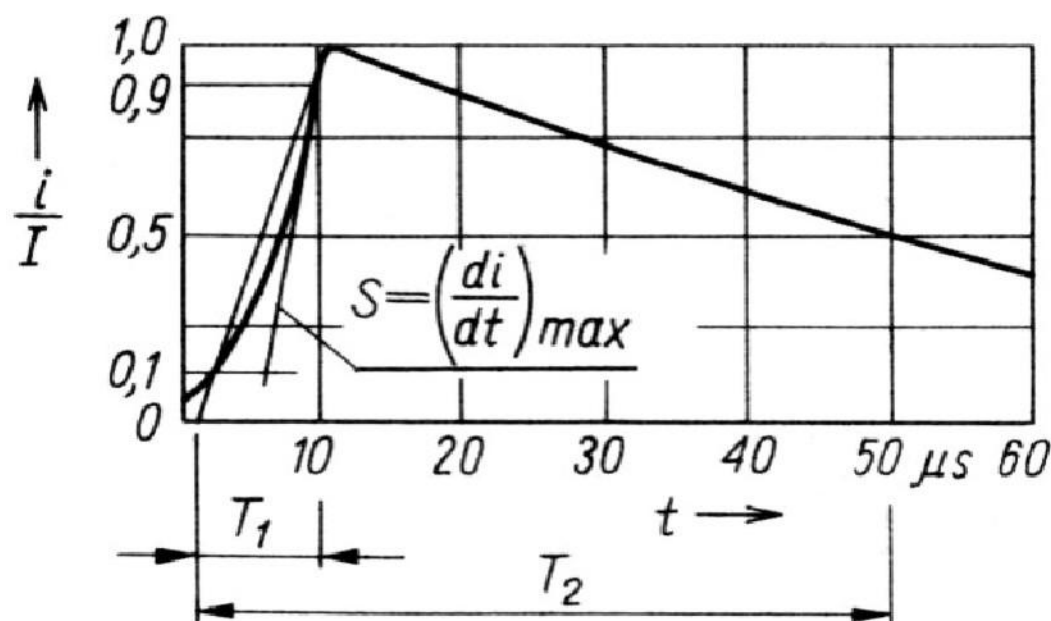
Typy wyładowań
piorunowych:

- a) i b) ujemny z chmury
do ziemi,
- c) i d) dodatni z chmury
do ziemi

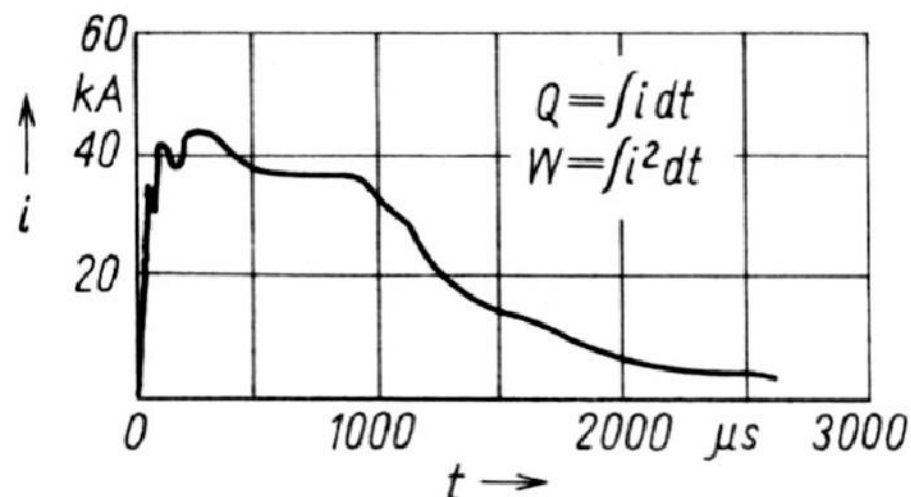
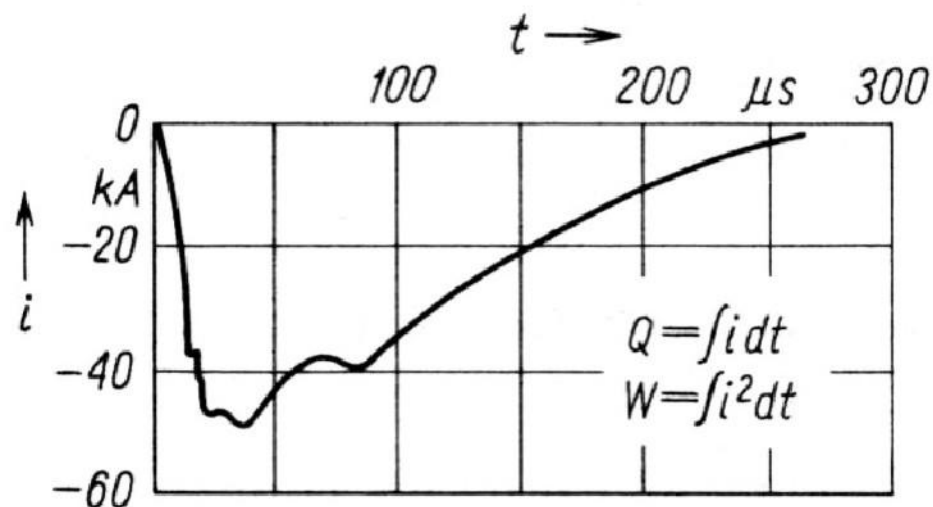
Parametry wyładowań piorunowych

Do parametrów wyładowania piorunowego, związanych z przebiegiem jego prądu o kształcie idealizowanym należą:

- wartość szczytowa prądu pioruna, I [kA]
- czas trwania czoła, T_1 [μ s]
- czas do półszczytu, T_2 [μ 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



Idealizowany kształt prądu piorunowego z zaznaczonymi parametrami



Przykładowe zarejestrowane przebiegi prądu piorunowego o biegunowości ujemnej i dodatniej

Parametry prądu piorunowego mają charakter losowy. Ich wartości są najczęściej zgodne z rozkładem logarytmiczno-normalnym, którego funkcja gęstości ma postać:

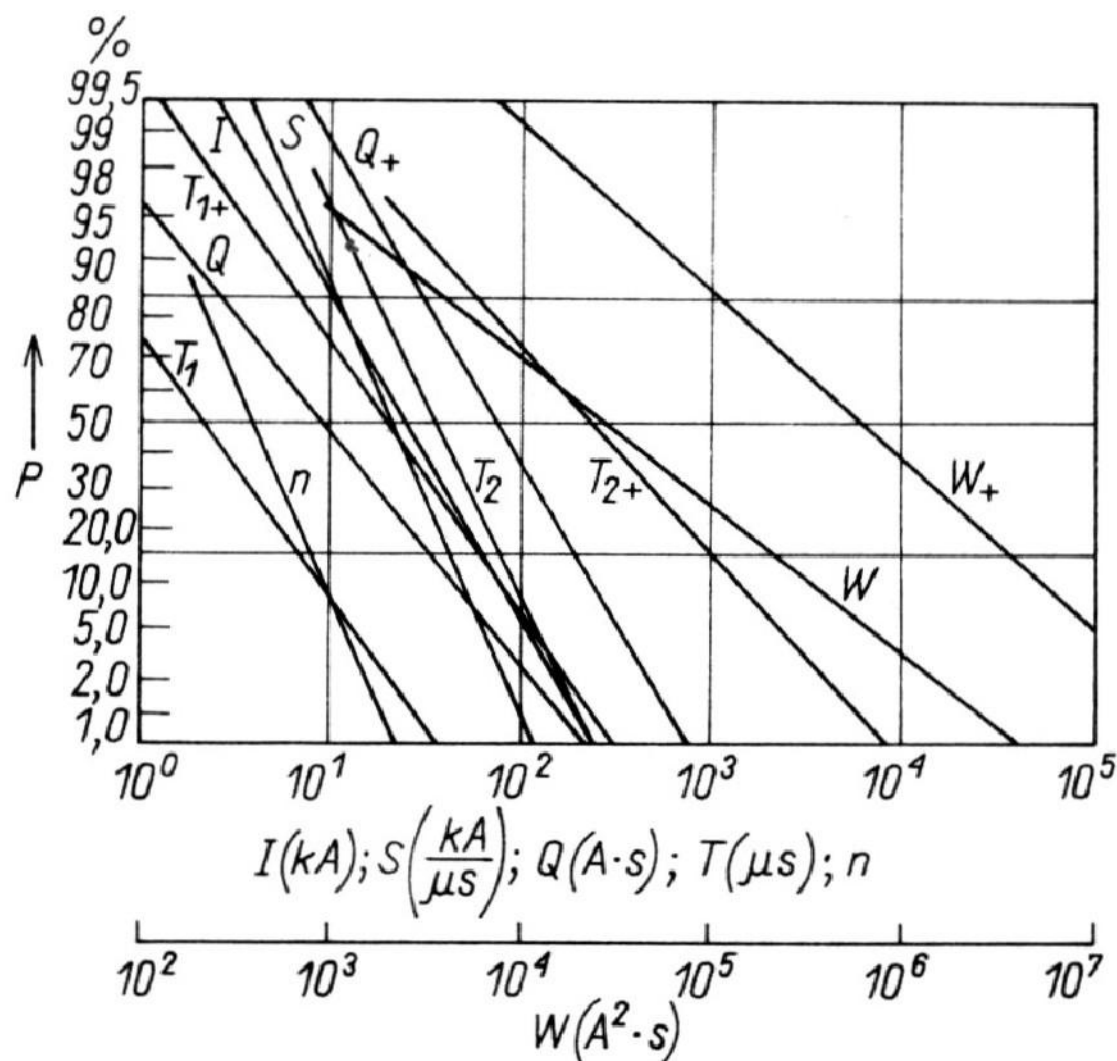
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot x \cdot \sigma_x} \exp \left[-\frac{1}{2} \frac{\ln^2 \frac{x}{X_m}}{\sigma_x^2} \right]$$

gdzie:

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

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

σ_x - odchylenie standardowe.



Skumulowane rozkłady
(dystybuanty) parametrów
wyładowań piorunowych

Wartości przeciętne (średnie) parametrów wyładowań piorunowych:

I 25 kA,

T_1 2,2 μs (udary ujemne), 20 μs (udary dodatnie),

T_2 54 μs (udary ujemne), 300 μs (udary dodatnie),

S 22 kA· μs^{-1} ,

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

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

n 3,8.



Przykład
wyładowań
między chmurami



Przykład
wyładowania
piorunowego
doziemnego
nierozgałęzionego



Przykład
wyładowań
piorunowych
doziemnych:
zupełnego
i niezupełnych



Przykład
wyładowania
piorunowego
doziemnego
dwumiejscowego

Zagrożenie piorunowe obiektów naziemnych

Zagrożenie piorunowe obiektów naziemnych zależy od wielu czynników, wśród których istotne znaczenie ma intensywność burzowa na danym terenie. Dotychczas określały ją mapy burzowe z podanymi na nich poziomami izokeraunicznymi lub inaczej z przeciętną dla danego terenu liczbą N_d dni burzowych w roku.

Obecnie jednak bardziej powszechne i dogodne staje się bezpośrednio operowanie wielkością N_r , określającą roczną liczbę wyładowań piorunowych przypadających na 1 km² powierzchni danego terenu.

Między liczbą N_r i N_d istnieje zależność. Uśredniając liczbę dni burzowych, która dla przeważającej części Polski jest równa 20, a tylko dla południowo-zachodnich jej krańców wynosi około 30, można przyjąć w pierwszym przypadku $N_r = 1,8 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, a w drugim $N_r = 3 \text{ km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. Obecnie wartość N_r uzyskuje się dzięki systemom automatycznej lokalizacji i rejestracji wyładowań piorunowych.

Zbieranie wyładowań przez obiekty naziemne

Doświadczenie wykazuje, że w obiekty naziemne uderza znacznie więcej piorunów niż wynikałoby to z iloczynu powierzchni zajmowanej przez te obiekty i liczby N_r . Powierzchnia, na którą przypada taka sama liczba wyładowań piorunowych jak w obiekt, ale w przypadku gdy tego obiektu nie ma, jest nazywana *powierzchnią zbierania wyładowań* lub krótko *powierzchnią ekwiwalentną*.

Niekwestionowaną obecnie podstawą oszacowania tej powierzchni, a tym samym i wybiórczości trafień piorunowych w obiekt, stanowią zależności wynikające z teorii elektro-geometrycznej. Podstawową jej wielkością jest odległość decyzji R_d , która - w krytycznej chwili wyboru miejsca trafienia pioruna - określa położenie czoła lidera zmierzającego w kierunku ziemi w stosunku do najbliższego elementu obiektu lub do ziemi. Inaczej mówiąc, gdy czoło lidera znajdzie się w dowolnym punkcie P na powierzchni decyzji, to z tego punktu nastąpi ostatni skok lidera do najbliższego punktu obiektu lub powierzchni ziemi.

Odległość decyzji R_d , zależy od wartości prądu I :

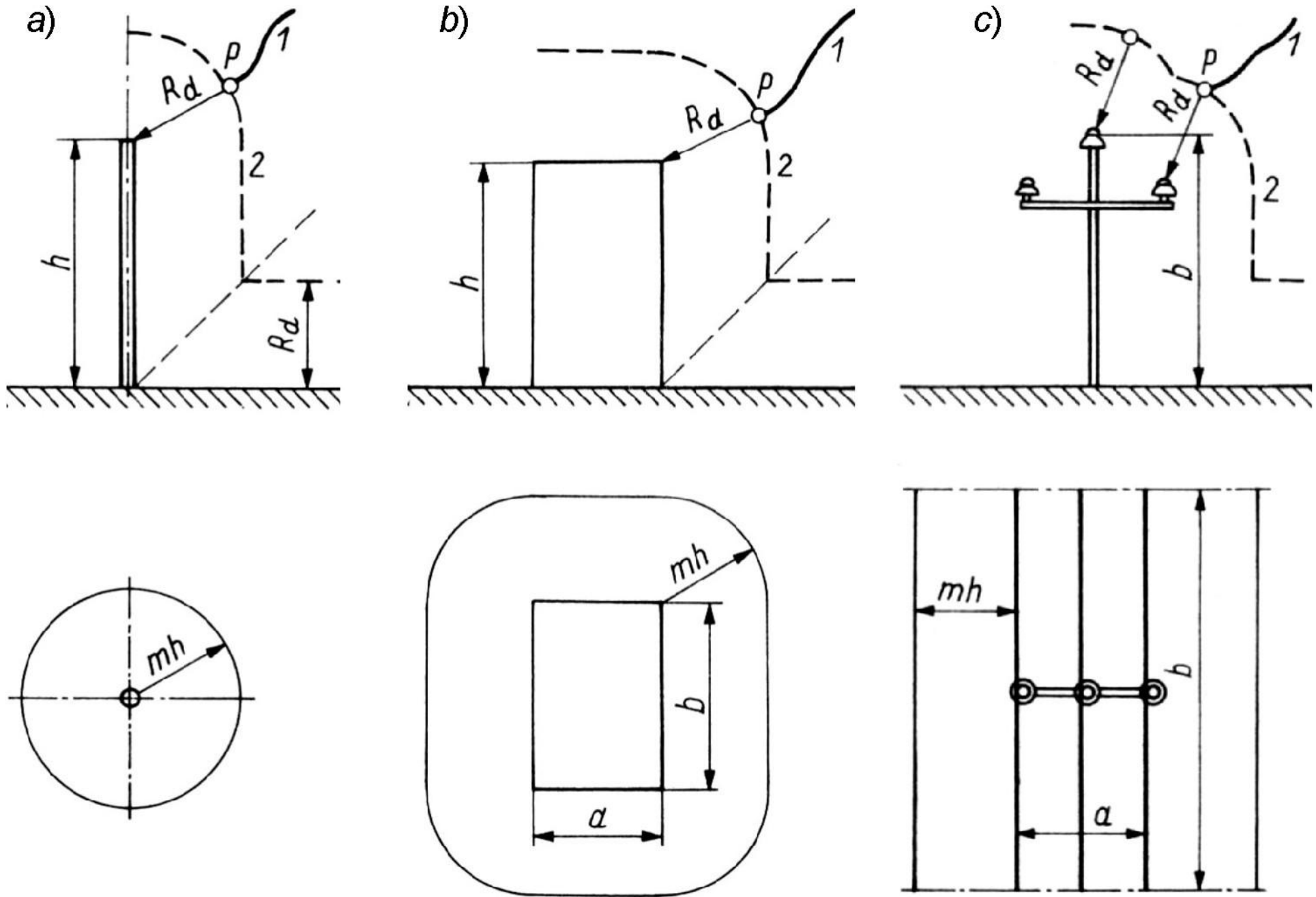
$$R_d = k \cdot I^p$$

w której średnie wartości współczynników wynoszą $k = 9,4$ oraz $p = 0,67$.

Dane statystyczne trafień piorunowych w obiekty o różnej wysokości h wykazują, że przeciętny zasięg m powierzchni ekwiwalentnej lub powierzchni zbierania wyładowań przez obiekt jest mniejszy niż wynikałoby to z przeciętnej wartości odległości decyzji R_d , równej w przybliżeniu około 80 m. Ponadto stosunek m tego zasięgu do wysokości h obiektu maleje z jej wzrostem wg zależności:

$$m = 13,4 h^{-0,5}$$

przy $h \leq 40$ m, a przy $h > 40$ m ustala się na poziomie $m = 2$.



Sytuacja w chwili decyzji trafienia pioruna w:

a) pojedynczy maszt, b) obiekt trójwymiarowy, c) linię napowietrzną;

1 - lider wyładowania piorunowego,

2 - powierzchnia decyzji.