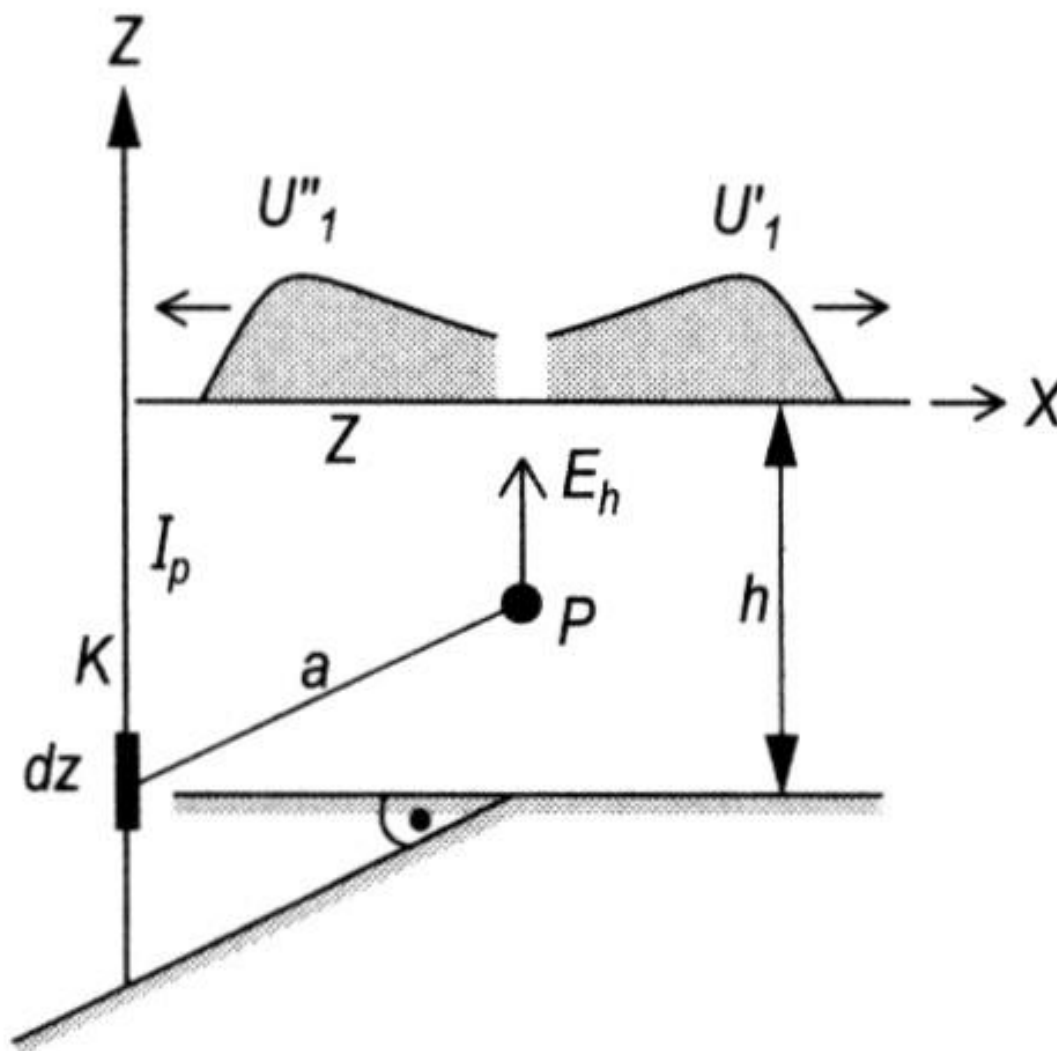
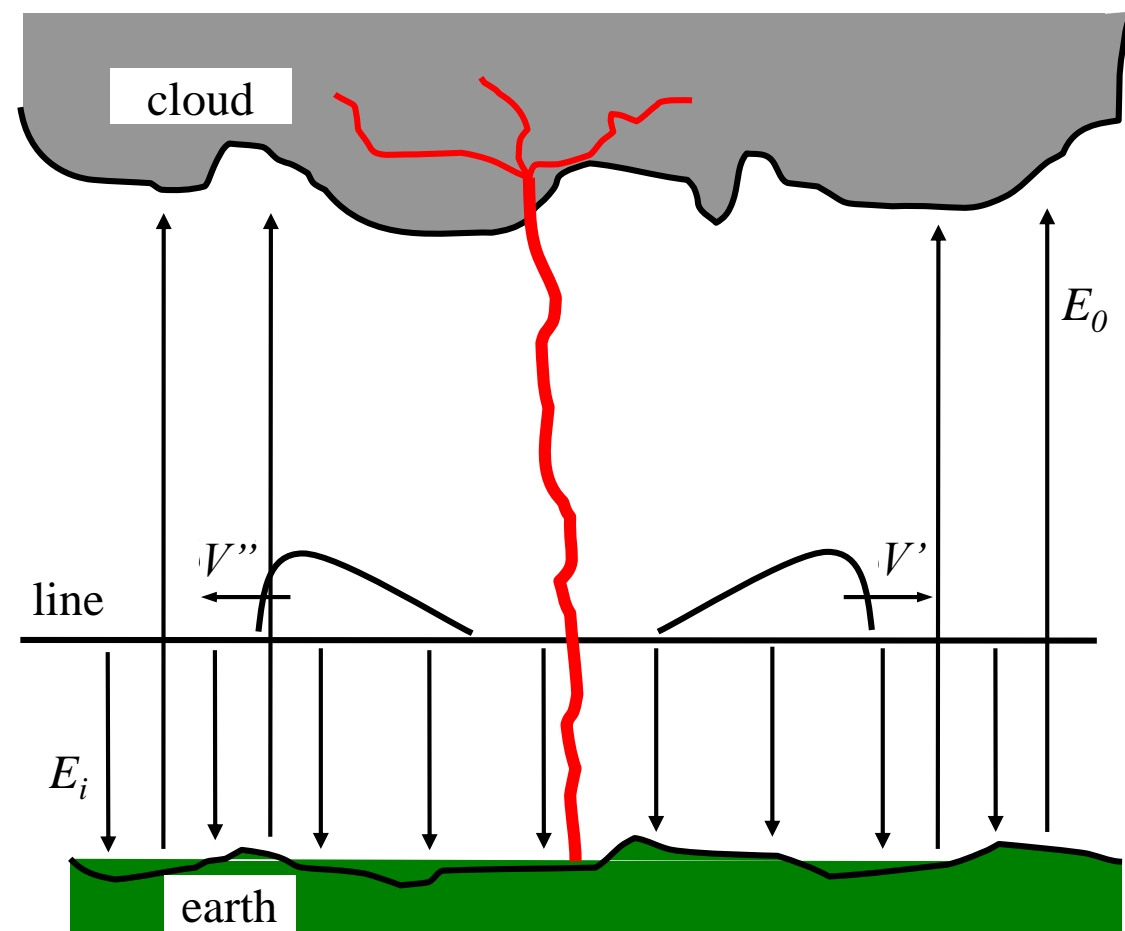
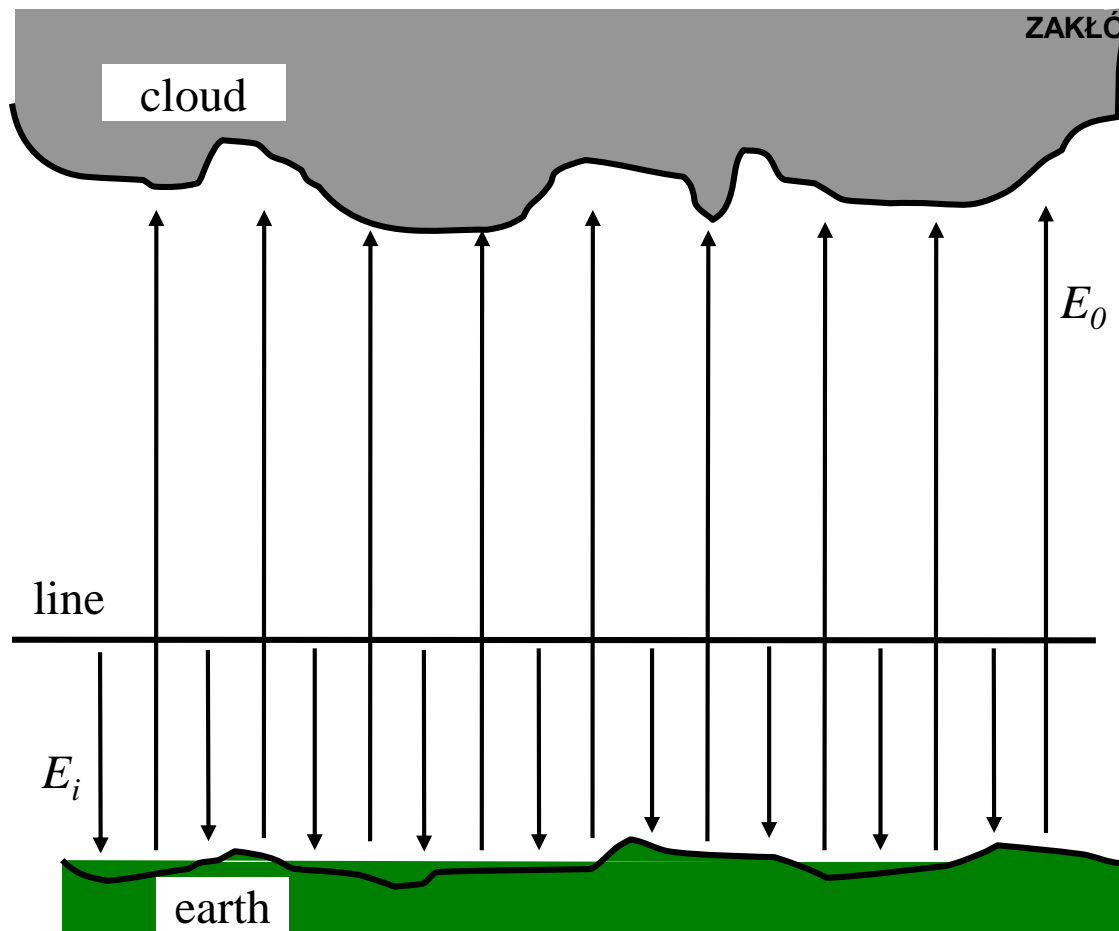


Przebiegi w liniach elektroenergetycznych

przebiegi piorunowe indukowane U_{pm} do 200 kV



Powstawanie przebiegów przy uderzeniu pioruna obok linii; składowa przebiegi indukowanego spowodowana falą ładunku w kanale pioruna K , który indukuje pole elektryczne między linią i ziemią (punkt P)

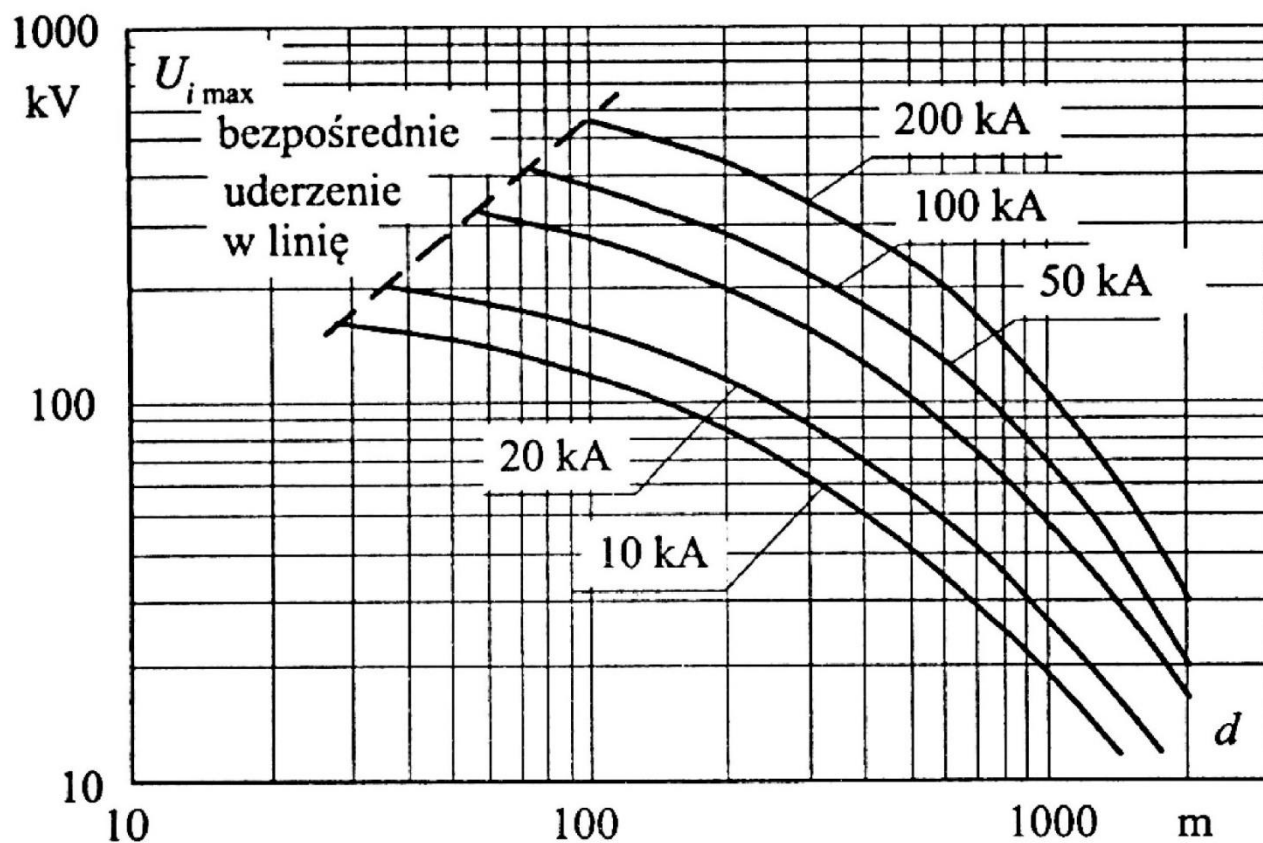


Powstawanie przepięć przy uderzeniu pioruna obok linii:

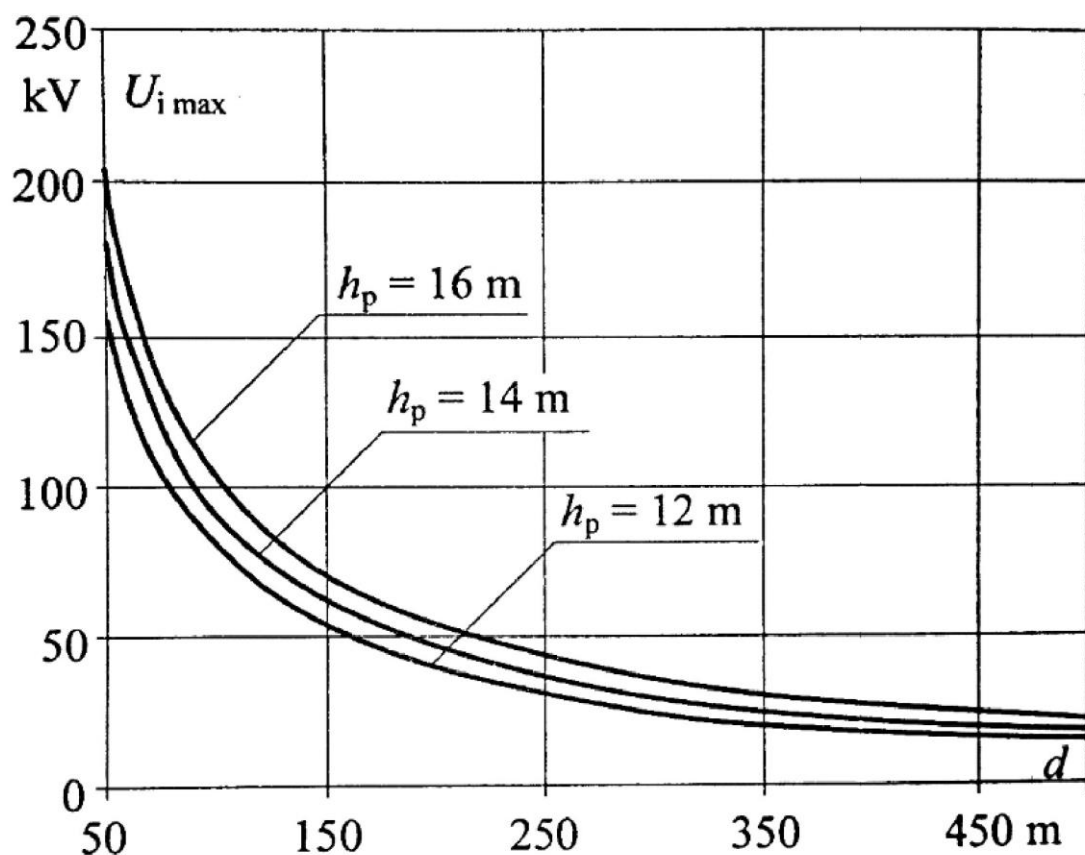
- składowa przepięcia indukowanego spowodowana zwarciem pola E_0 przez wyładowanie piorunowe;

E_0 - pole elektryczne między chmurą a ziemią,

E_i - pole elektryczne spowodowane ładunkiem na linii indukowanym przez E_0

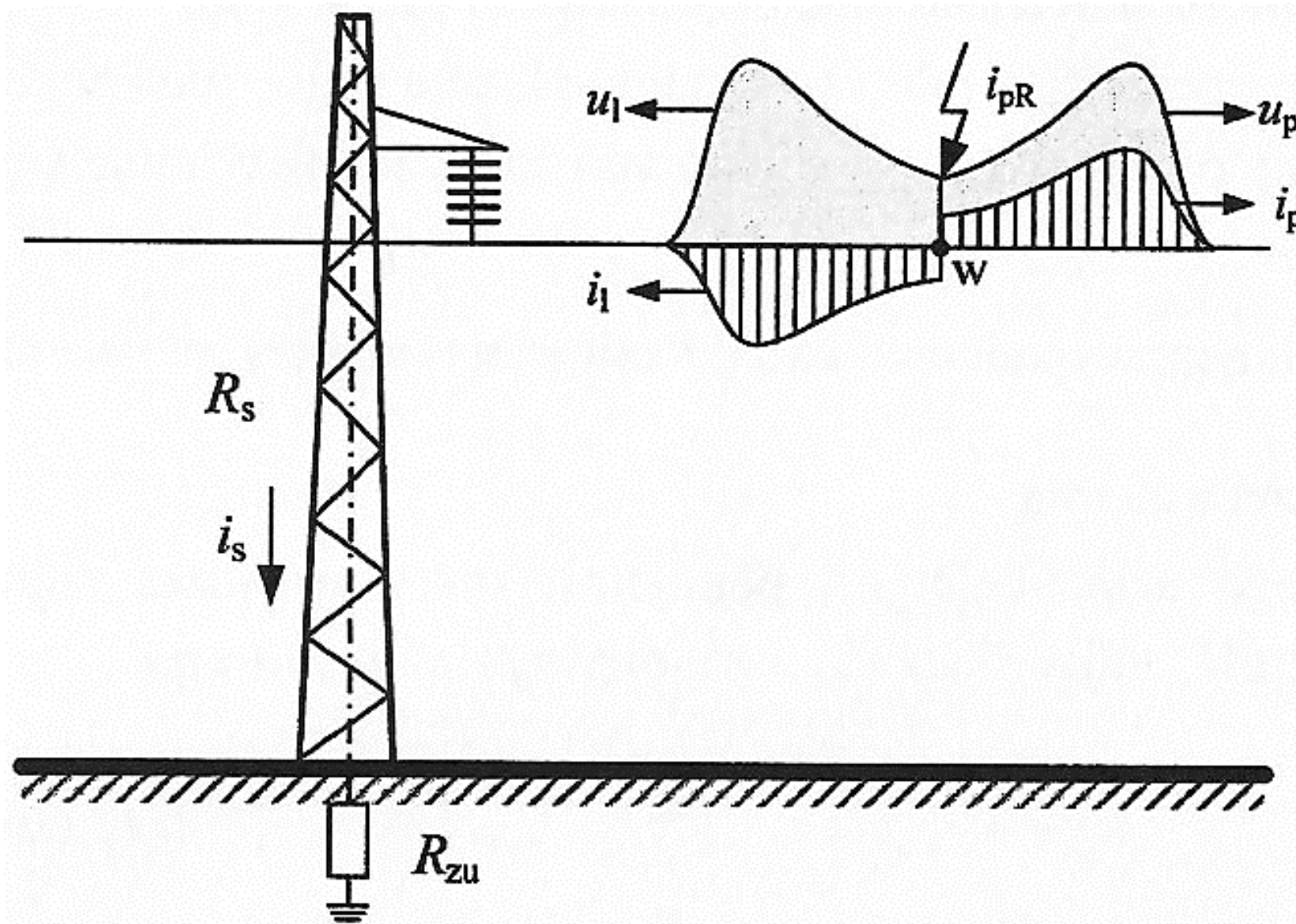


Wartości szczytowe przepięć indukowanych w liniach SN w zależności od odległości uderzenia pioruna dla różnych wartości jego prądu

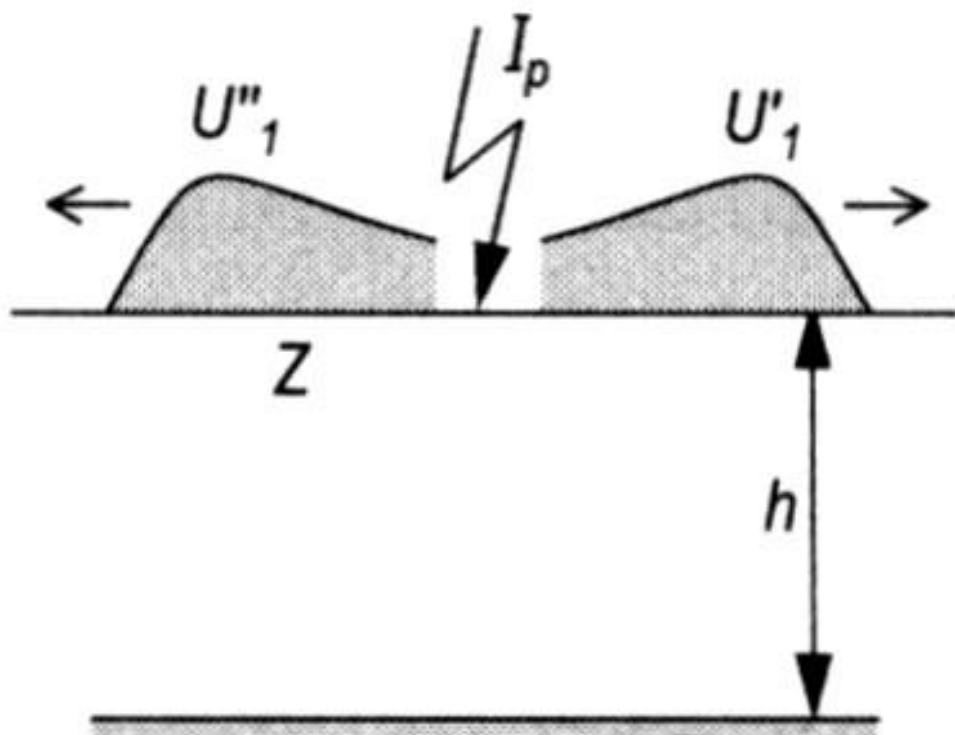


Wartości szczytowe przepięć indukowanych w przewodach linii napowietrznych w zależności od odległości uderzenia pioruna dla trzech różnych wysokości zawieszenia przewodów linii nad ziemią

Przebiegi piorunowe bezpośrednie



Szkic wyładowania piorunowego do przewodu linii napowietrznej oraz wytworzonych przez niego fal napięciowych rozchodzących się w tej linii



Powstawanie przebiegów przy uderzeniu pioruna w przewód fazowy linii napowietrznej;
 U'_1 i U''_1 - fale przebiegiowe spowodowane ładunkiem pioruna wpływającym do linii

$$U'_1 = U''_1 = \frac{Z \cdot I_p}{2}$$

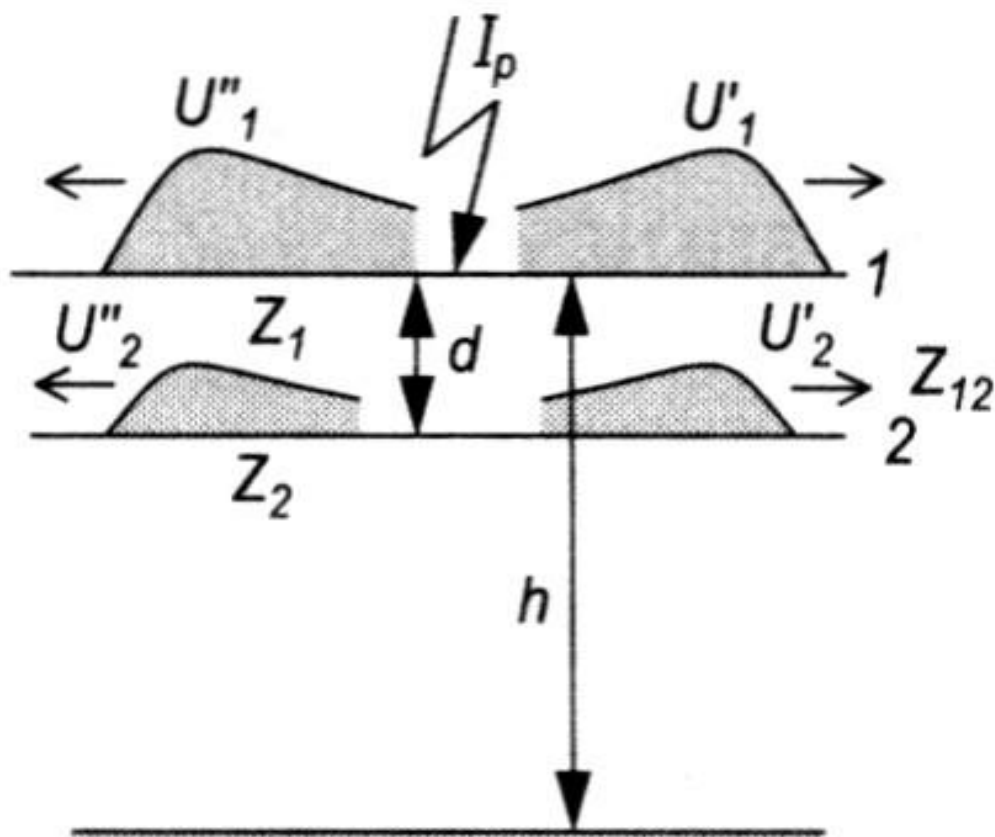
dla:

$$I_{pm} = 25 \text{ kA}, \quad Z = 500 \, \Omega$$

otrzymujemy:

$$U'_1 = U''_1 = 6,25 \text{ MV}$$

Żadna izolacja nie wytrzyma takiego napięcia. Fale przebiegiowe zostaną ucięte na ich czole przez przeskok do innych przewodów i ziemi.



Z_1 , Z_2 , Z_{12} - impedancje falowe: odpowiednio, przewodu odgromowego, przewodu fazowego, wzajemna

$$U'_1 = \frac{Z_1 \cdot I_p}{2}$$

$$U'_2 = k \cdot U'_1$$

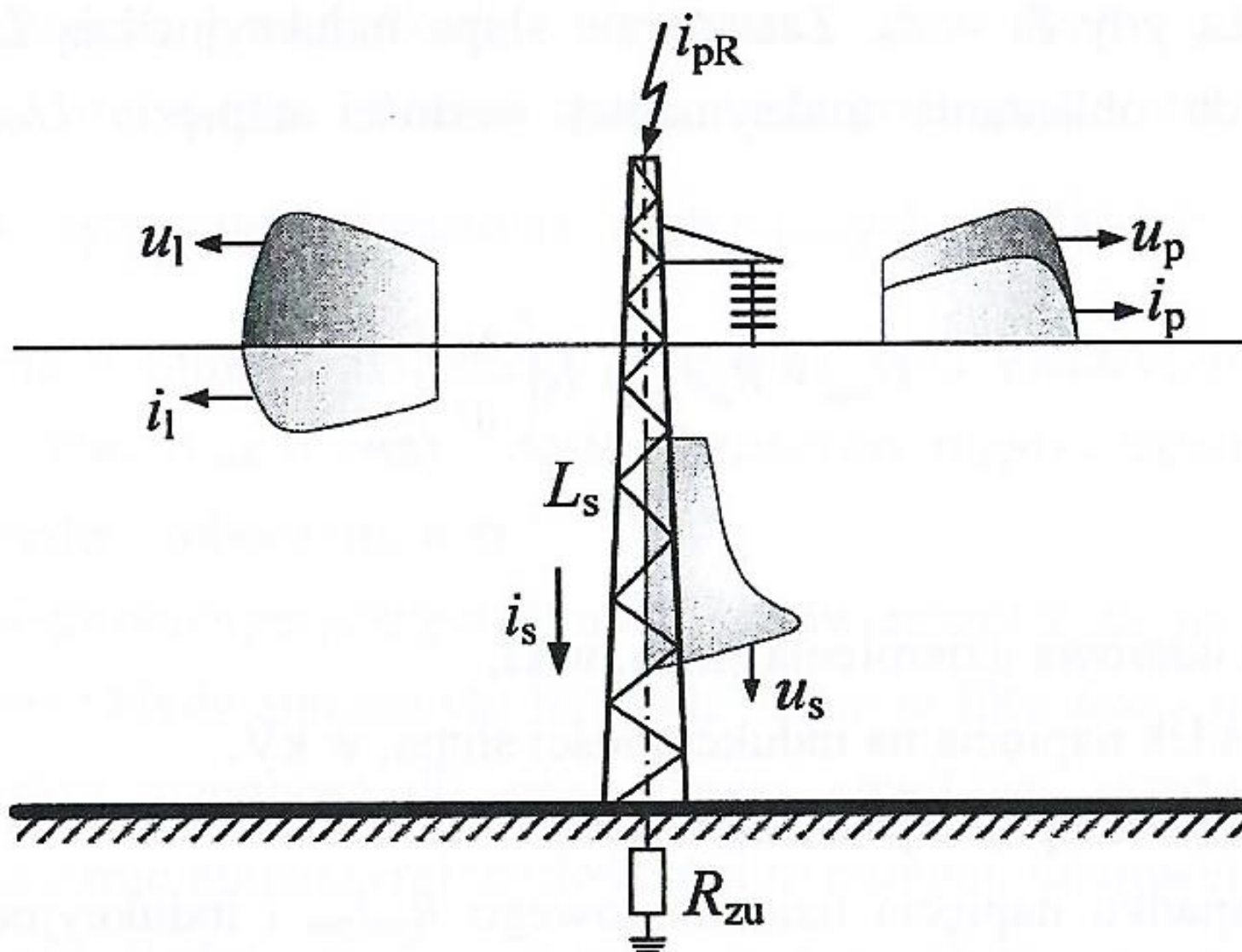
$$k = \frac{Z_{12}}{Z_1} \approx \frac{\ln \frac{2h}{a}}{\ln \frac{2h}{r}}$$

$$U_{12} = (1 - k) U'_1$$

Powstawanie przepięć przy uderzeniu pioruna w przewód odgromowy linii napowietrznej;

U'_1 i U''_1 - fale przepięciowe spowodowane ładunkiem pioruna wpływającym do przewodu odgromowego

U'_2 i U''_2 - fale przepięciowe indukowane w przewodzie fazowym przez fale w przewodzie odgromowym



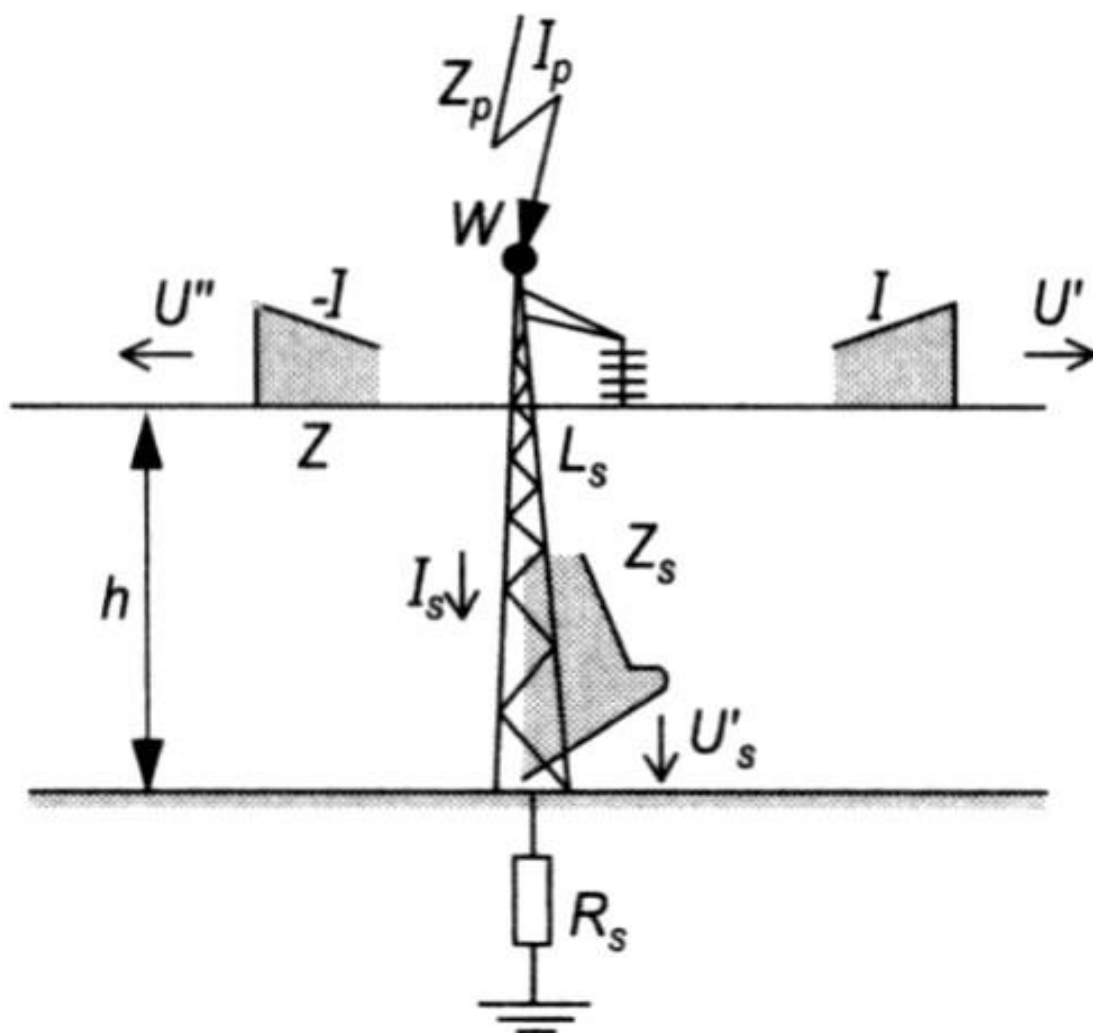
Powstawanie przepięć przy uderzeniu pioruna w słup przewodzący bez przewodu odgromowego;

L_s, R_{zu} - indukcyjność słupa i rezystancja jego uziemienia;

i_{pR} - prąd pioruna;

u_s - fala przepięciowa w słupie;

u_l, u_p, i_l, i_p - fale przepięciowe i prądowe indukowane w przewodzie;
fazowym przez fale u_s, i_s w słupie



Z, Z_S - impedancje falowe przewodu fazowego i słupa
 L_S, R_S - indukcyjność i rezystancja na drodze prądu piorunowego

$$U_{wm} = R_S I_{pm} + L_S \left(\frac{di_p}{dt} \right)_{\max}$$

dla:

$$I_{pm} = 25 \text{ kA}$$

$$(di_p/dt)_{\max} = 22 \text{ kA}/\mu\text{s}$$

$$R_S = 10 \text{ } \Omega$$

$$L_S = 10 \text{ } \mu\text{H}$$

otrzymujemy:

$$U_{wm} = 470 \text{ kV}$$

Powstawanie przepięć przy uderzeniu pioruna w słup przewodzący bez przewodu odgromowego;

U'_s - fala przepięciowa w słupie;

U' i U'' - fale przepięciowe indukowane w przewodzie fazowym przez fale w słupie

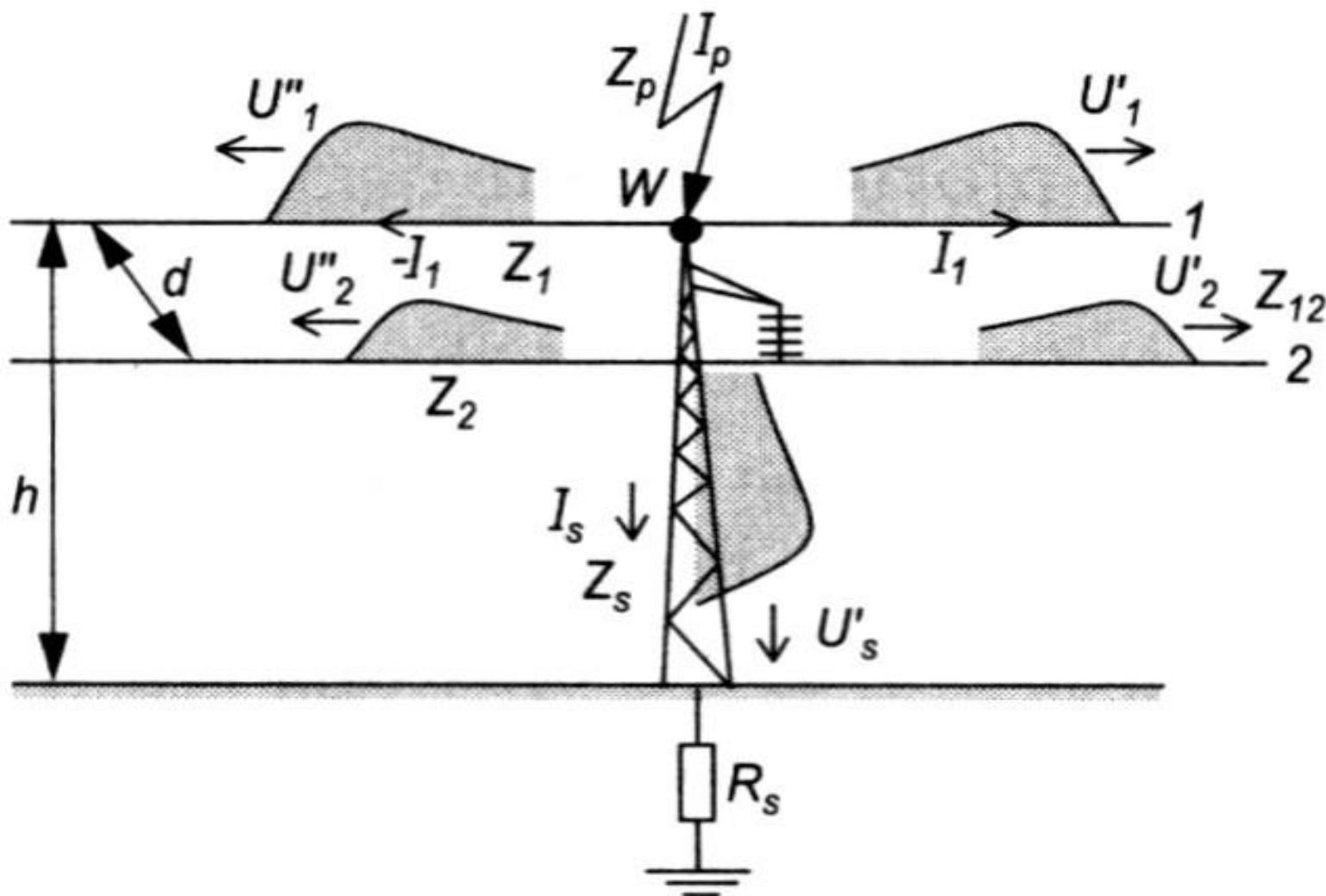
Sumowanie rezystancyjnych i indukcyjnych maksymalnych spadków napięcia jest uzasadnione dla idealnego kształtu impulsu przebiegowego, w którym maksymalna stromość prądu i wartość szczytowa pojawiają się w przybliżeniu w tym samym momencie, a zaniedbanie małego przemieszczenia oznacza przeszacowanie zagrożenia.

Napięcie U_{wm} może powodować przeskok odwrotny na izolatorze, gdy przekroczy jego napięcie wytrzymałowe U_u .

Porównanie tych dwóch wartości pozwala oszacować dopuszczalną wartość rezystancji uziemienia słupa R_s , przy której spodziewane wartości I_{pm} i $(di_p/dt)_{max}$ nie powodują przeskoku iskry, co wynika z następującego warunku:

$$R_s < \left[\frac{U_u}{I_{pm}} - \frac{L_s}{I_{pm}} \left(\frac{di_p}{dt} \right)_{max} \right]$$

Nawet wartość $R_s = 0$ może być niewystarczająca, gdy indukcyjny spadek napięcia $L_s(di_p/dt)_{max}$ będzie większy od U_u .



Powstawanie przebiegów przy uderzeniu pioruna w słup przewodzący w linii z przewodem odgromowym;

U'_s - fala przebiegiowa w słupie;

U'_1 i U''_1 - fale przebiegiowe w przewodzie odgromowym

U'_2 i U''_2 - fale przebiegiowe indukowane w przewodzie fazowym

Prąd pioruna I_p dzieli się na dwa prądy I_1 w przewodzie uziemiającym o impedancji Z_1 i na prąd I_s w maszcie o impedancji Z_s .

Ten podział wynika z relacji:

$$I_p = 2I_1 + I_s \quad Z_1 I_1 = Z_s I_s$$

z których można obliczyć prądy:

$$I_1 = \frac{Z_s}{Z_1 + 2Z_s} I_p \quad I_s = \frac{Z_1}{Z_1 + 2Z_s} I_p$$

Dla średnich wartości impedancji; $Z_s = 150 \Omega$ i $Z_1 = 450 \Omega$, otrzymujemy: $I_s = 0,6 I_p$, oraz $I_1 = 0,2 I_p$.

Powyższe relacje zmieniają się po powrocie fal odbitych od ziemi i sąsiednich słupów, ale zmiany te są zwykle nieistotne.

Impedancje Z_1 i Z_s można zastąpić indukcyjnościami L_1 i L_s :

$$L_1 = \frac{Z_1}{\nu} I_1 \quad L_s = \frac{Z_s}{\nu} I_s$$

gdzie: I_1 i I_s - długość przewodu odgromowego i wysokość słupa, $\nu = 300 \text{ m}/\mu\text{s}$.

Maksymalna wartość napięcia na szczycie słupa:

$$U_{wm} = R_s I_{sm} + L_s \left(\frac{di_s}{dt} \right)_{\max}$$

gdzie: I_{sm} - wartość szczytowa prądu I_s na słupie,
 $(di_s/dt)_{\max}$ - maksymalna stromość prądu I_s .

Przewód uziemiający zmniejsza napięcie szczytowe słupa U_w z powodu podziału prądu i napięcia U_{12} na izolacji linii ze względu na jego połączenie z przewodem pod napięciem zgodnie z zależnością:

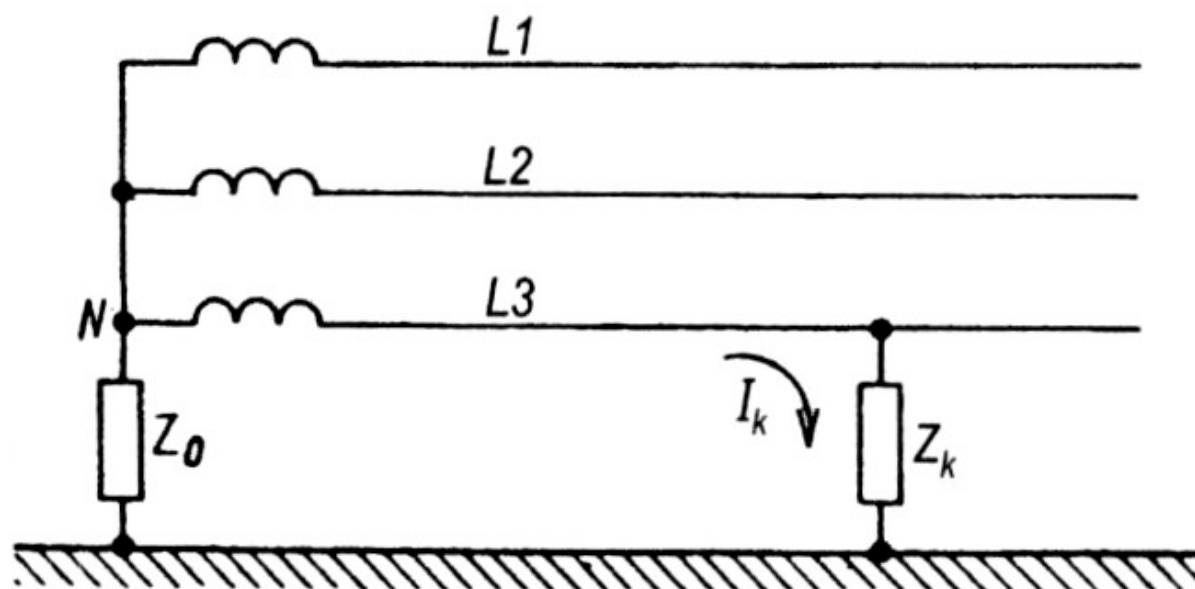
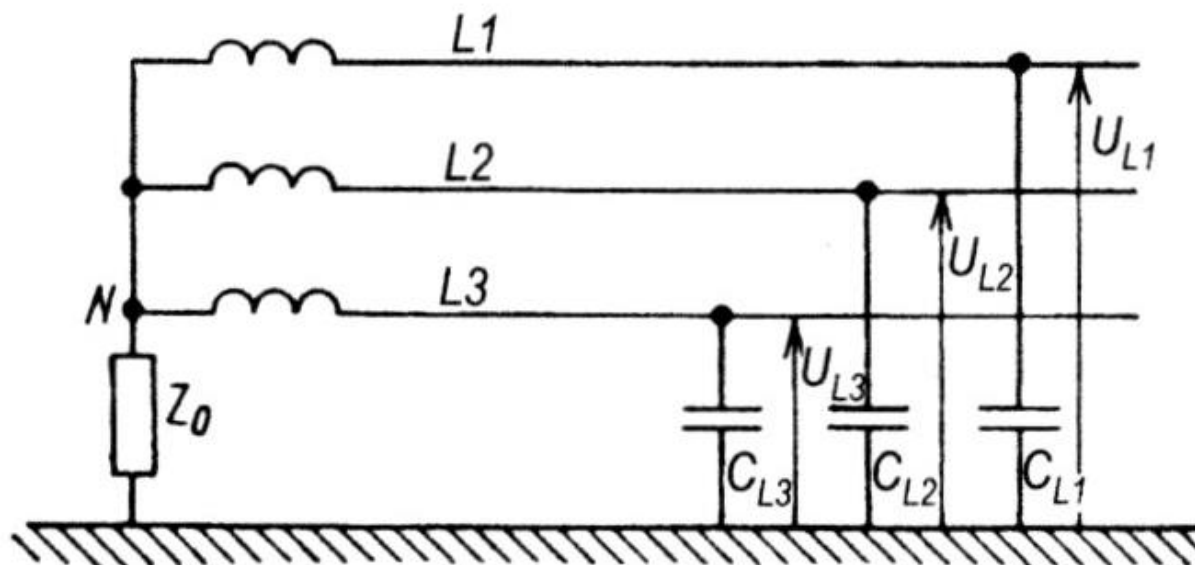
$$U_{12} = (1 - k) U_w$$

gdzie:

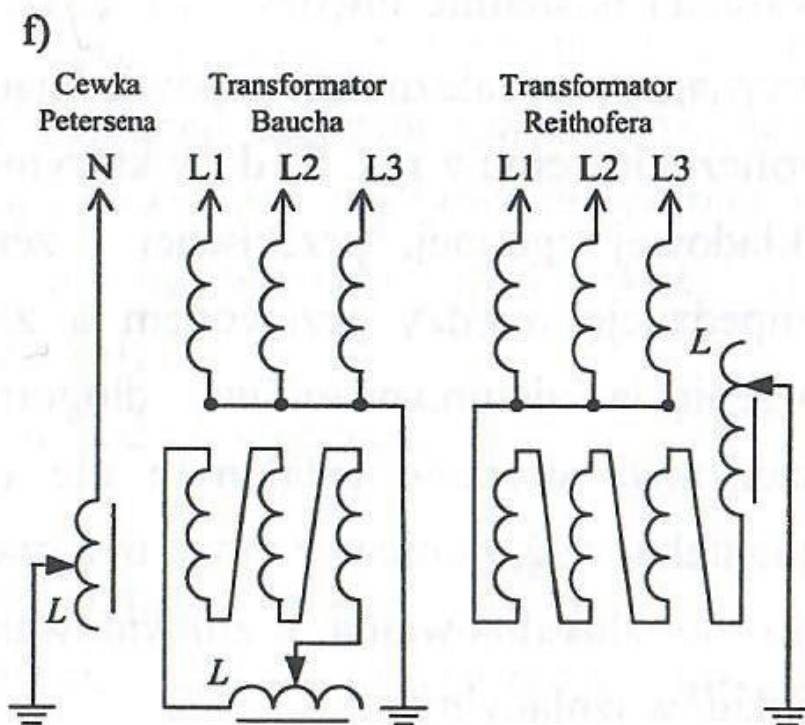
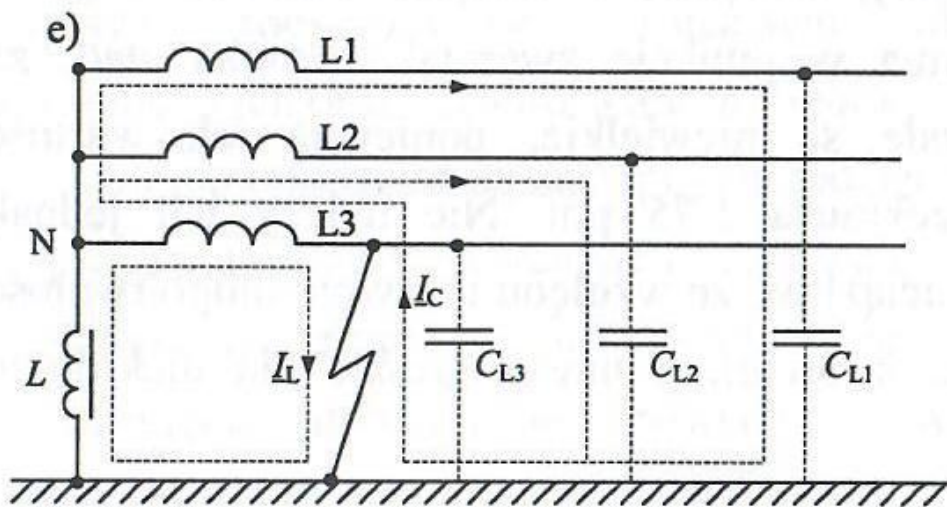
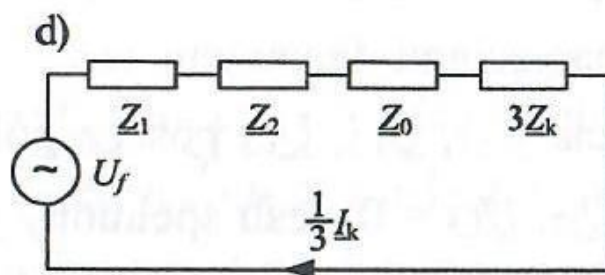
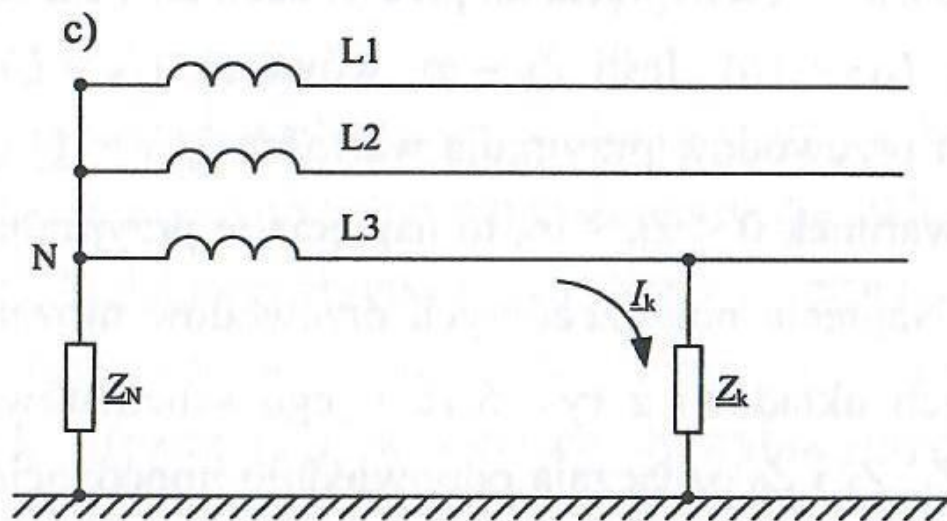
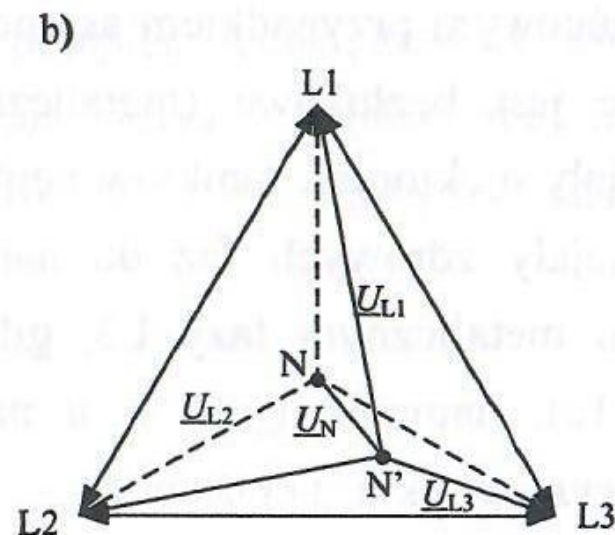
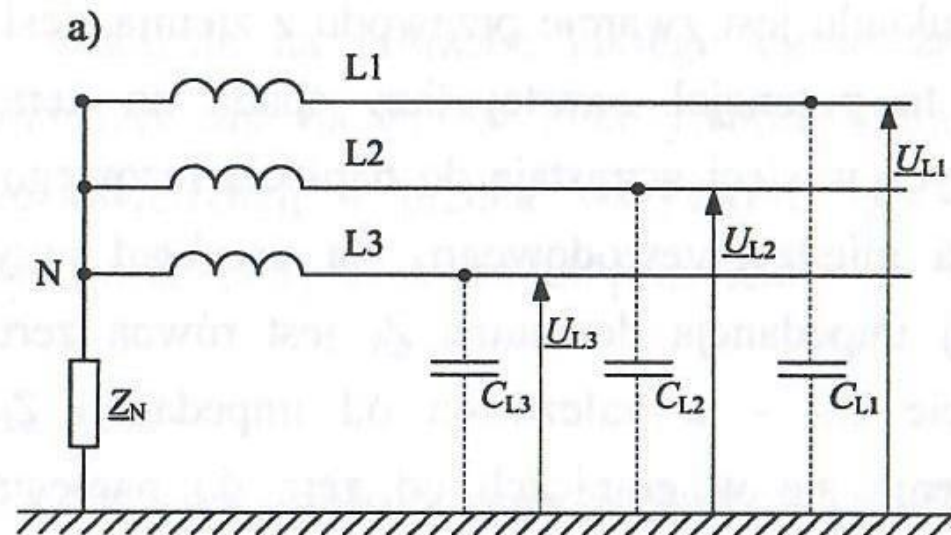
$$k = \frac{Z_{12}}{Z_1} \approx \frac{\ln \frac{2h}{a}}{\ln \frac{2h}{r}}$$

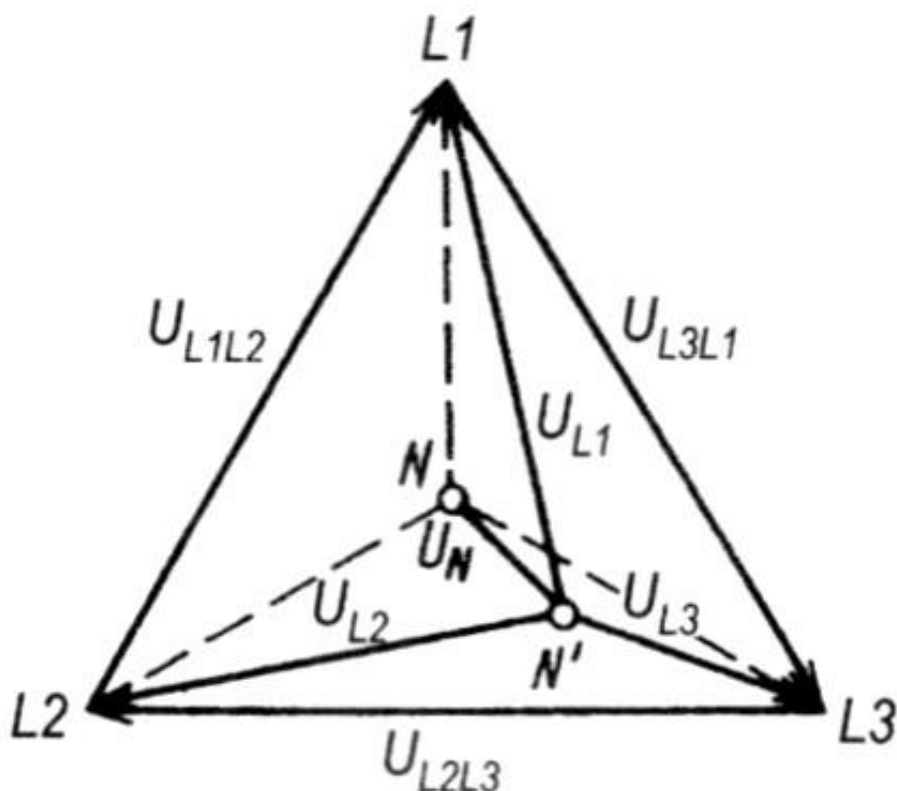
Można oczekiwać dodatkowej redukcji napięcia w związku ze zjawiskiem ulotu podczas propagacji fali wzdłuż przewodu uziemiającego.

Przebiegi wewnętrzne dorywcze ziemnozwarciowe



Fragment systemu 3-fazowego w normalnym stanie pracy i przy doziemieniu jednej fazy





Wykres wskazowy napięć w systemie 3-fazowym w normalnym stanie pracy (linie przerywane) i przy doziemieniu jednej fazy

Współczynnik zwarcia doziemnego:

$$k_e = \frac{U_{Lnz}}{U_{Lno}}$$

gdzie:

U_{Lnz} - napięcie fazy zdrowej n (np. fazy L_1) względem ziemi podczas zwarcia z ziemią innej fazy (np. fazy L_3),

U_{Lno} - napięcie w tym samym miejscu fazy zdrowej n (np. fazy L_1) względem ziemi przed jej zwarcie z ziemią.

Współczynnik uziemienia punktu neutralnego:

$$k_u = \frac{U_{Lnz}}{\sqrt{3} \cdot U_{Lno}} = \frac{k_e}{\sqrt{3}}$$

gdzie:

U_{Lnz} - napięcie fazy zdrowej n (np. fazy L_1) względem ziemi podczas zwarcia z ziemią innej fazy (np. fazy L_3),

$\sqrt{3} \cdot U_{Lno}$ - najwyższe napięcie robocze sieci.

Wartości współczynników k_e i k_u zależą od wzajemnych zależności między reaktancjami X_1 dla składowej symetrycznej zgodnej i składowej zerowej X_0 oraz między reaktancjami X_1 i rezystancjami dla składowej zerowej R_0 , jak niżej.

$$X_0 \leq 3X_1 \text{ i } R_0 \leq X_1 \quad \rightarrow \quad k_e \leq 1,4 \text{ i } k_u \leq 0,8$$

$$X_0 \leq 2X_1 \text{ i } R_0 \leq 0,5X_1 \quad \rightarrow \quad k_e \leq 1,3 \text{ i } k_u \leq 0,75$$

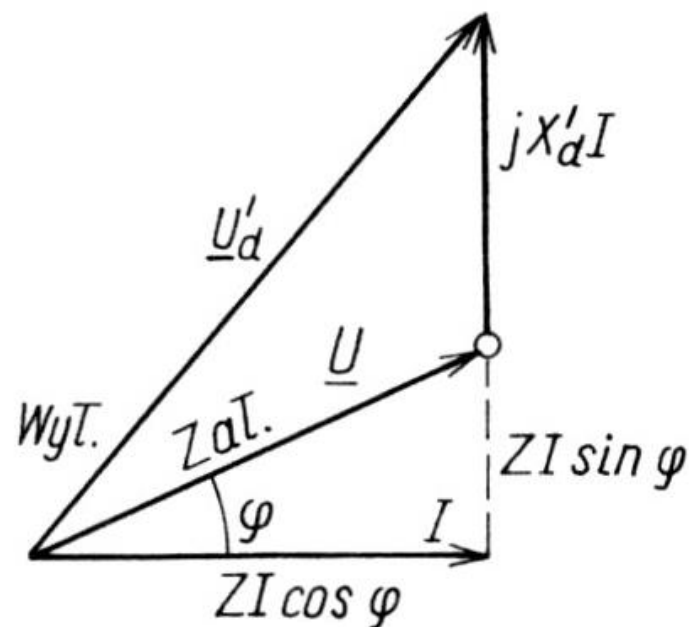
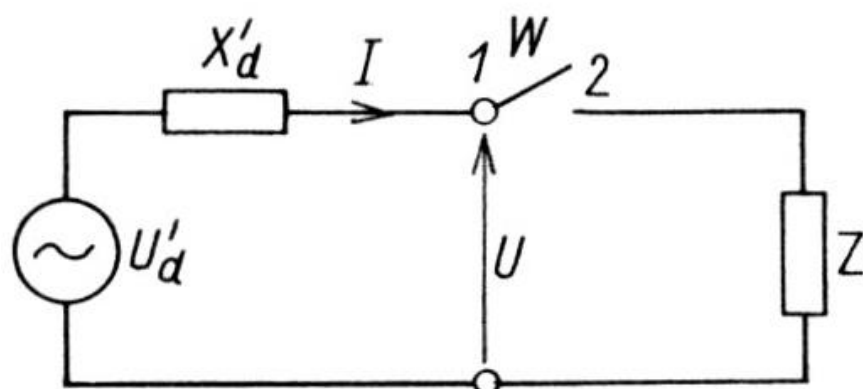
$$X_0 \leq X_1 \text{ i } R_0 \leq 0,5X_1 \quad \rightarrow \quad k_e \leq 1,1 \text{ i } k_u \leq 0,65$$

W przypadku izolowanego punktu neutralnego sieci:

$$k_{e\max} = \sqrt{3}, \quad k_{u\max} = 1$$

Przebiegi wewnętrzne dorywcze dynamiczne

Przebiegi dynamiczne przy wyłączeniu dużego obciążenia



Ilustracja warunków powstania przebiegów dynamicznych po wyłączeniu odbiorów o dużej mocy

$$k_d = \left| \frac{\underline{U}'_d}{\underline{U}} \right| = \sqrt{\frac{Z^2 \cos^2 \varphi + (\pm Z \sin \varphi + X'_d)^2}{Z^2 \cos^2 \varphi + Z^2 \sin^2 \varphi}} = \sqrt{1 + \left(\frac{X'_d}{Z} \right)^2 \pm \frac{2X'_d}{Z} \sin \varphi}$$

gdzie znak przy $\sin \varphi$: – przy obciążeniu indukcyjnym,
+ przy obciążeniu pojemnościowym.

Współczynnik k_d może osiągać wartości do 1,8.

Przebiegi dynamiczne przy załączeniu linii długiej nieobciążonej

$$k_d = \left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{1}{\cos 2\pi \frac{xf}{v}}$$

U_1, U_2 - amplitudy napięcia na początku i na końcu linii

x - długość linii

f - częstotliwość napięcia roboczego

v - prędkość fali

dla:

$$x = 600 \text{ km}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

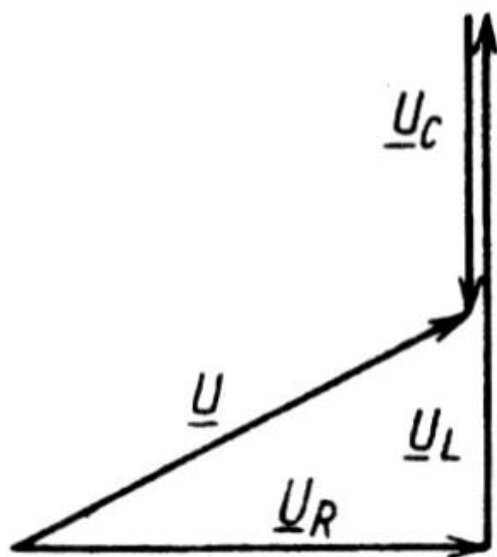
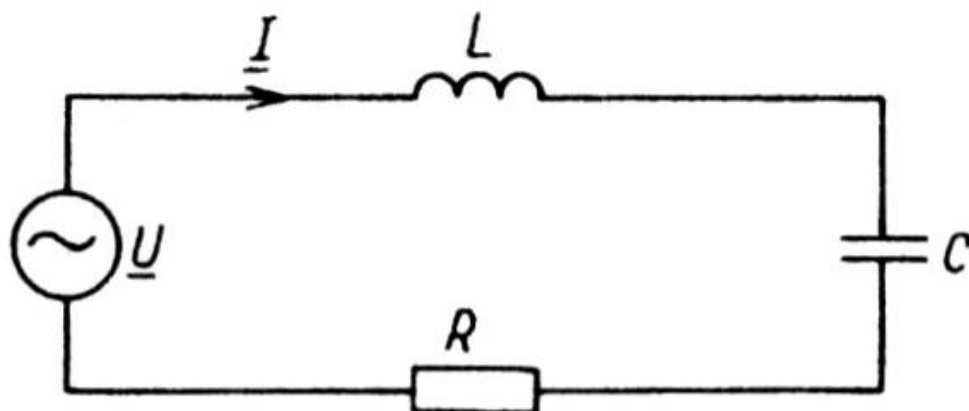
$$v = 300 \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

otrzymujemy:

$$k_d = 1,24$$

Przebiegi wewnętrzne dorywcze rezonansowe

Przebiegi przy rezonansie szeregowym w obwodzie liniowym



Ilustracja przebieg rezonansowych;
układ i wykres wskazowy

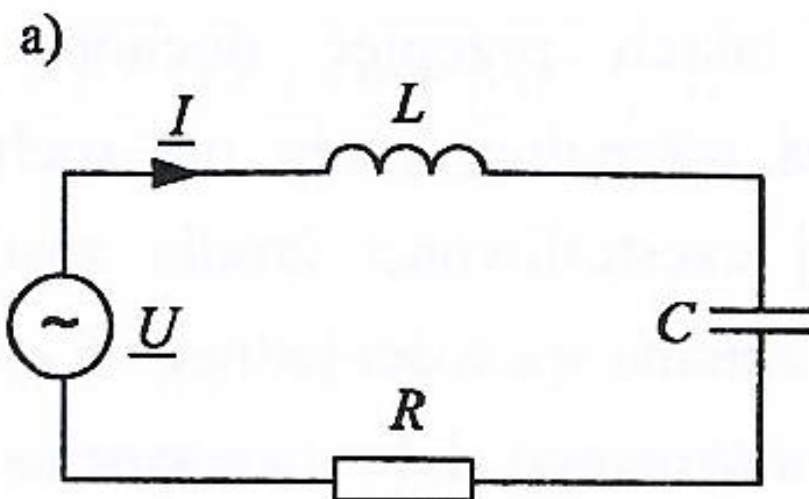
warunek rezonansu:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}$$

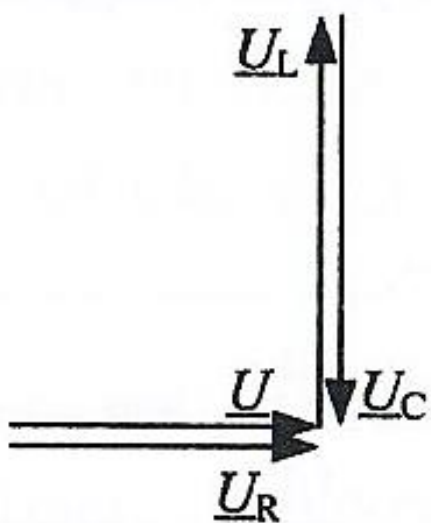
współczynnik przebieg:

$$k_r = \left| \frac{U_C}{U} \right| = \left| \frac{U_L}{U} \right| = \frac{1}{R\omega C} = \frac{\omega L}{R}$$

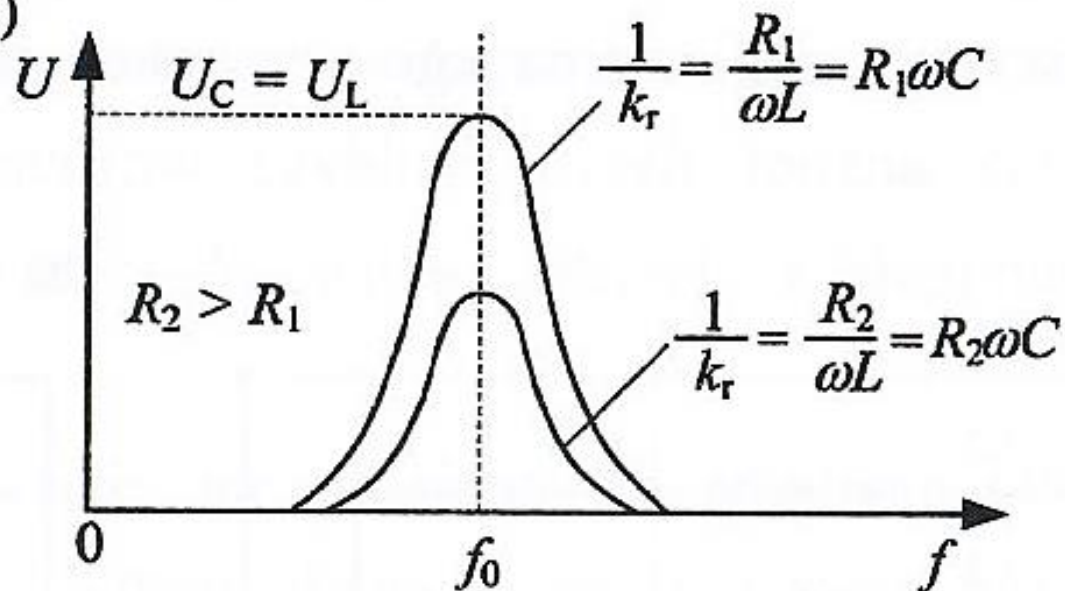
k_r może dochodzić do 3



b)



c)

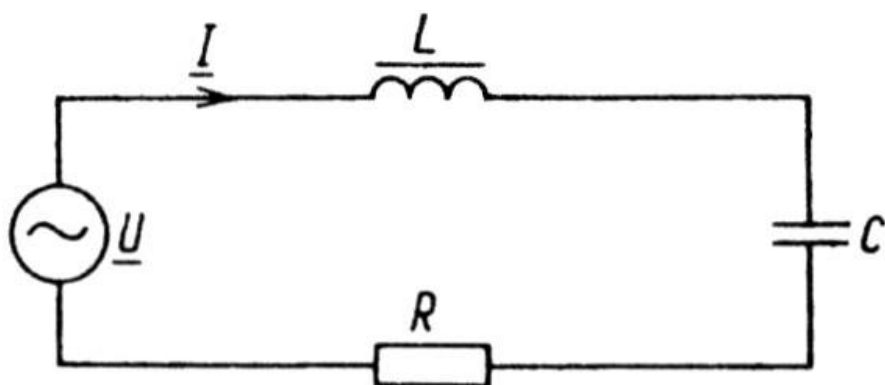


Ilustracja idealnego rezonansu napięć:

a) układ elektryczny,

b) wykres wskazowy,

c) charakterystyka częstotliwościowa napięcia.

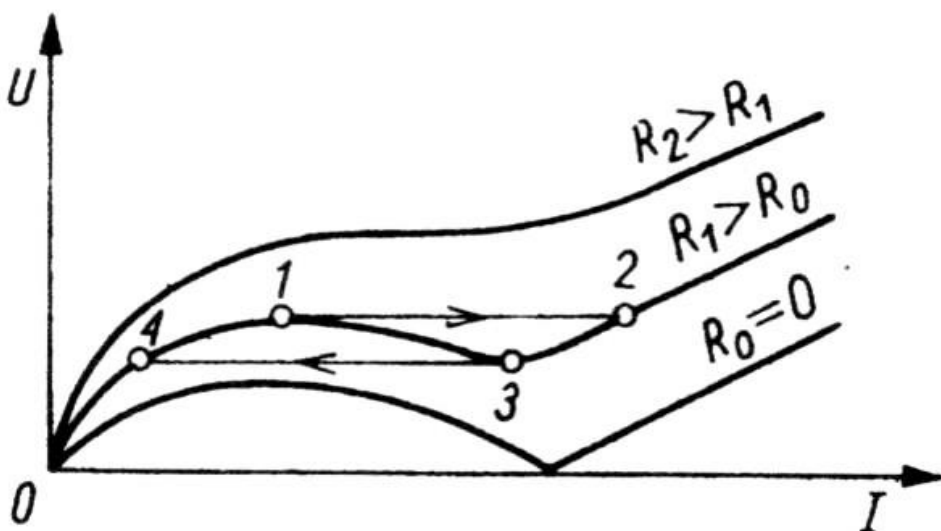
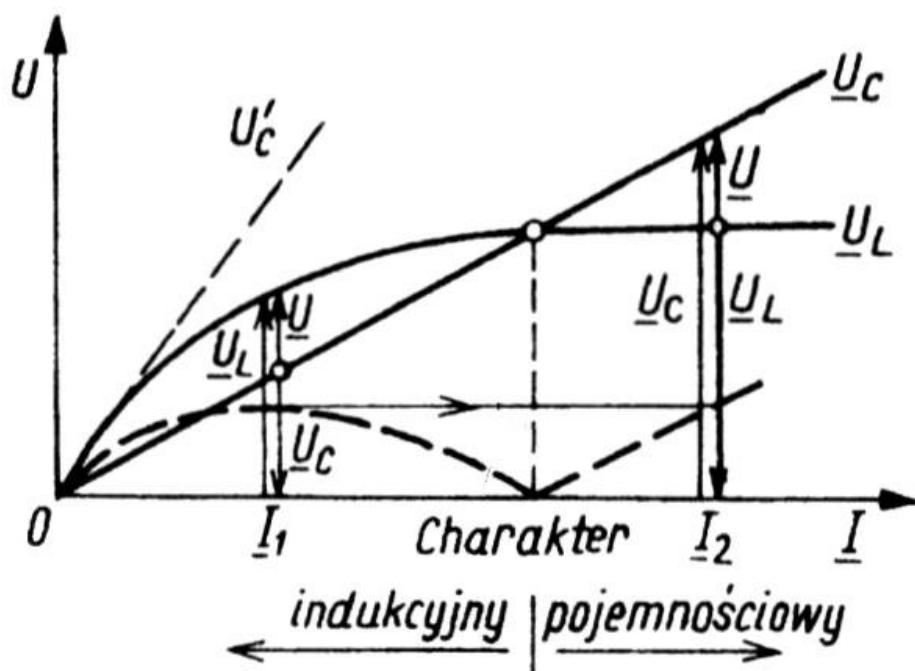


Przebiegi ferrerezonansowe

L - element nieliniowy
(nasycający się rdzeń)

$$|U| = |U_L - U_C|$$

zmiany charakteru obwodu,
tzw. przewroty, przy zmianie
napięcia zasilającego; nagłe
zmiany prądu



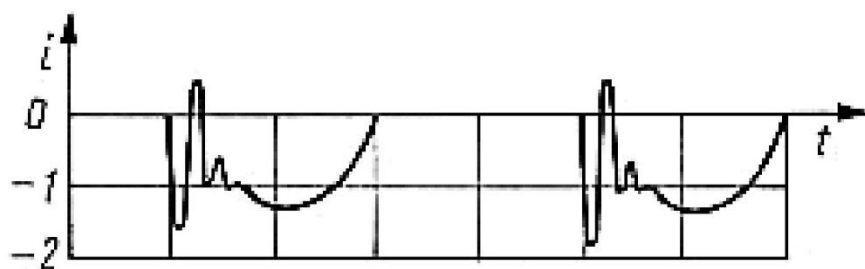
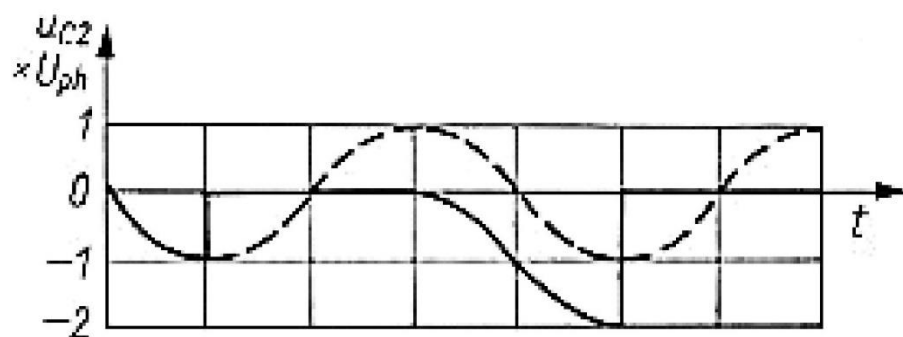
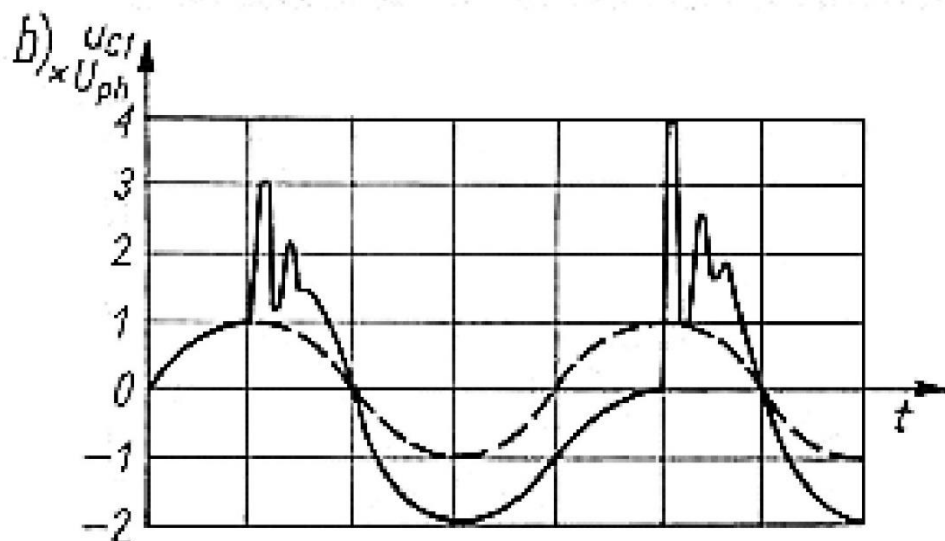
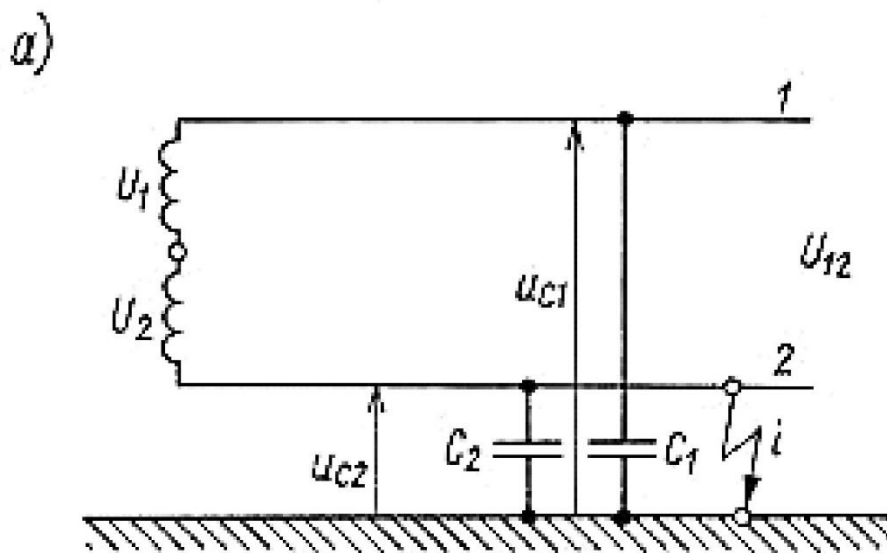
Ilustracja przebiegów
ferrerezonansowych;
układ i charakterystyki

Przebiegi wewnętrzne łączeniowe awaryjne

Przebiegi przy przerywanym zwarciu z ziemią

Dwie wersje mechanizmu sukcesywnego zwiększania się przebiegi spowodowanego przerywaniem prądu łuku zwarcia doziemnego:

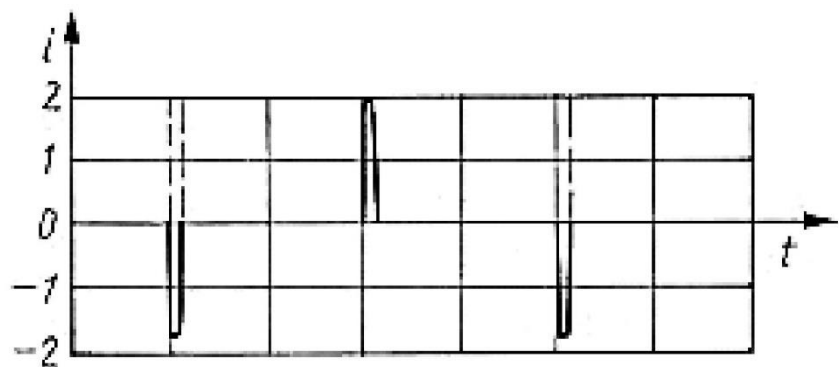
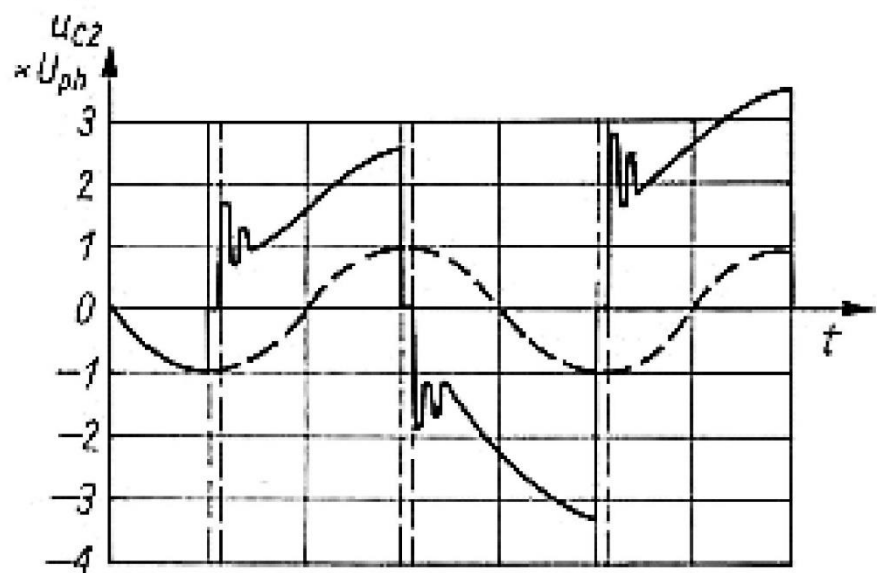
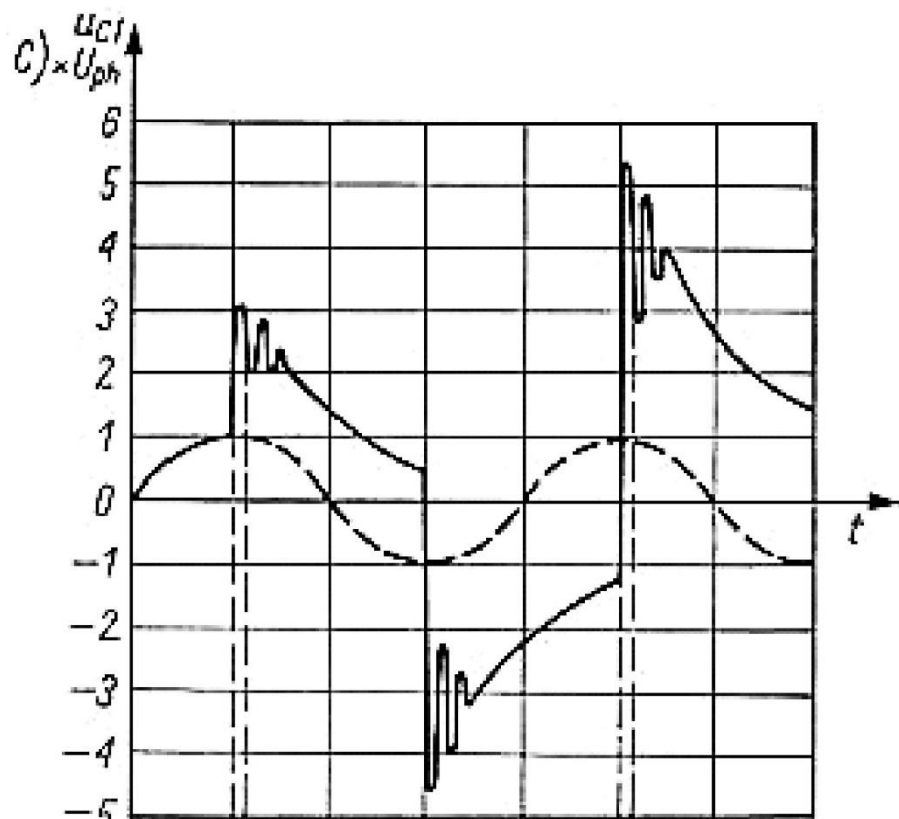
- wersja Petersa i Slepiana, w której zakłada się, że łuk jest przerywany, gdy wolnozmienna składowa prądu zwarcia przechodzi przez zero;
- wersja Petersena, w której zakłada się, że łuk jest przerywany, gdy szybkozmienna (oscylacyjna) składowa prądu zwarcia przechodzi przez zero.



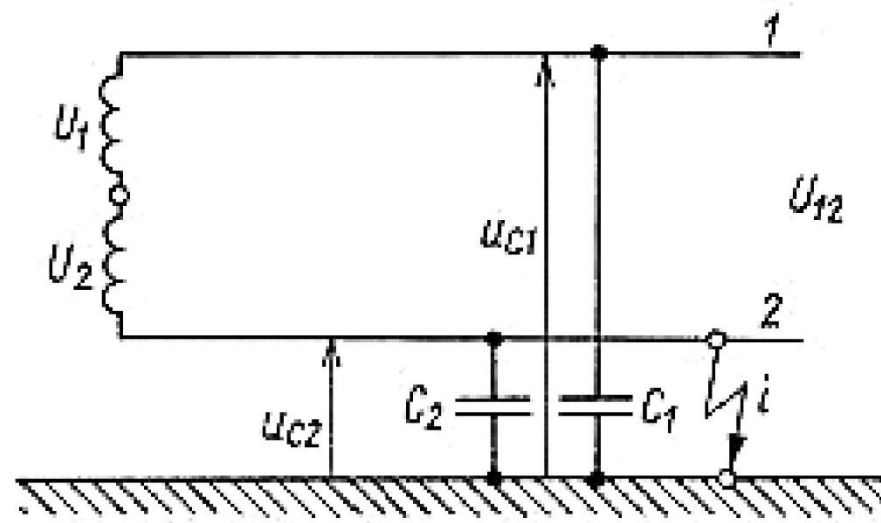
Przykład powstawania i rozwoju przebiegów zgodnie z mechanizmem Petersa i Slepiana:

a) schemat układu,

b) przebiegi napięcia i prądu.



a)



Przykład powstawania i rozwoju przebiegów zgodnie z mechanizmem Petersena:

- a) schemat układu,
c) przebiegi napięcia i prądu.