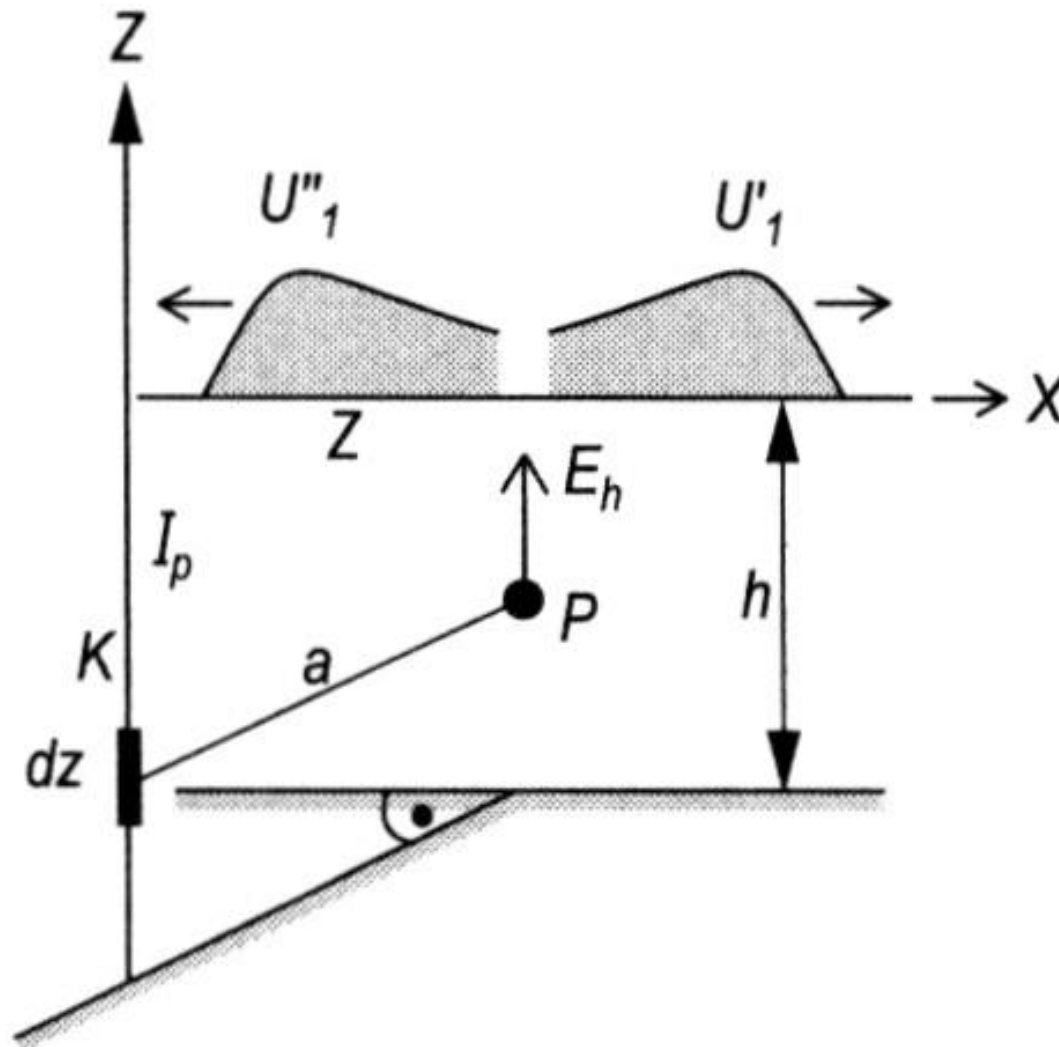
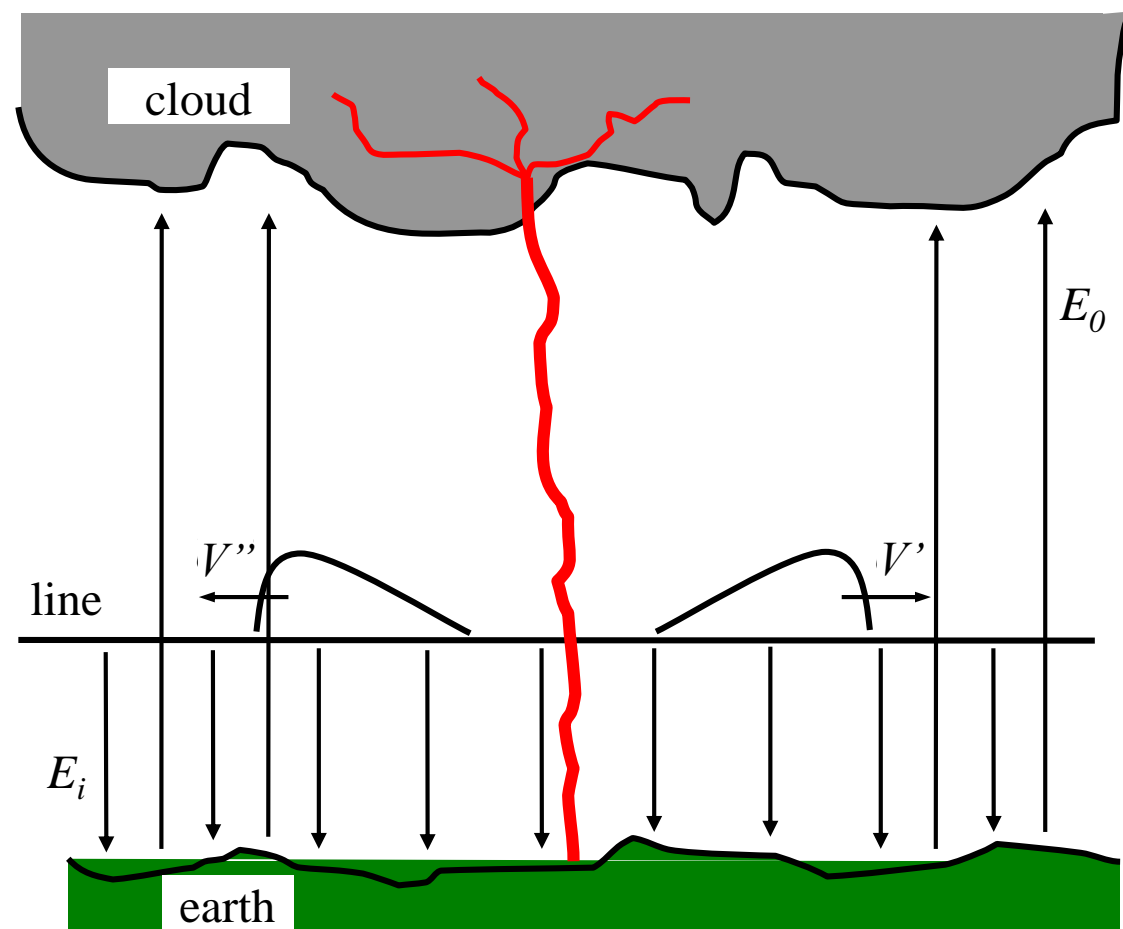
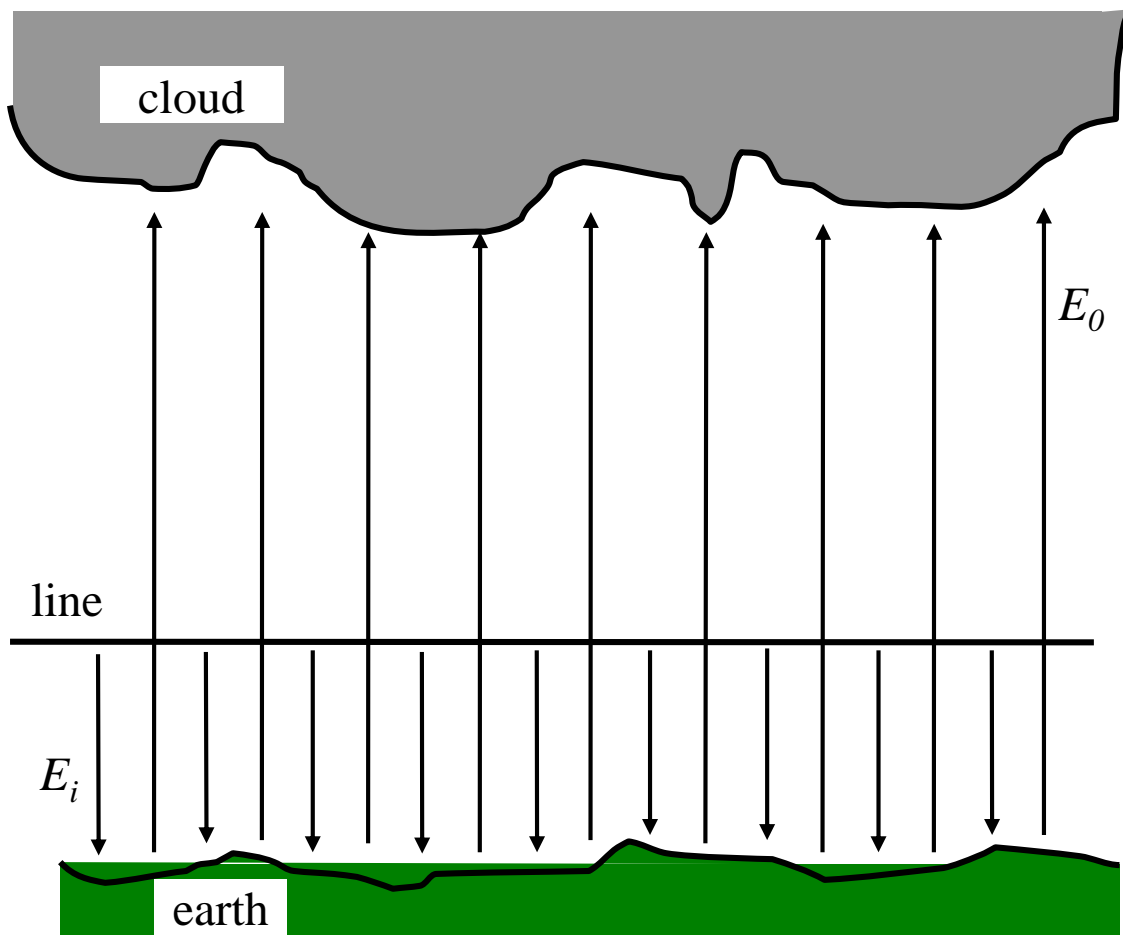


# Przebiegi w liniach elektroenergetycznych

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  $P$ )

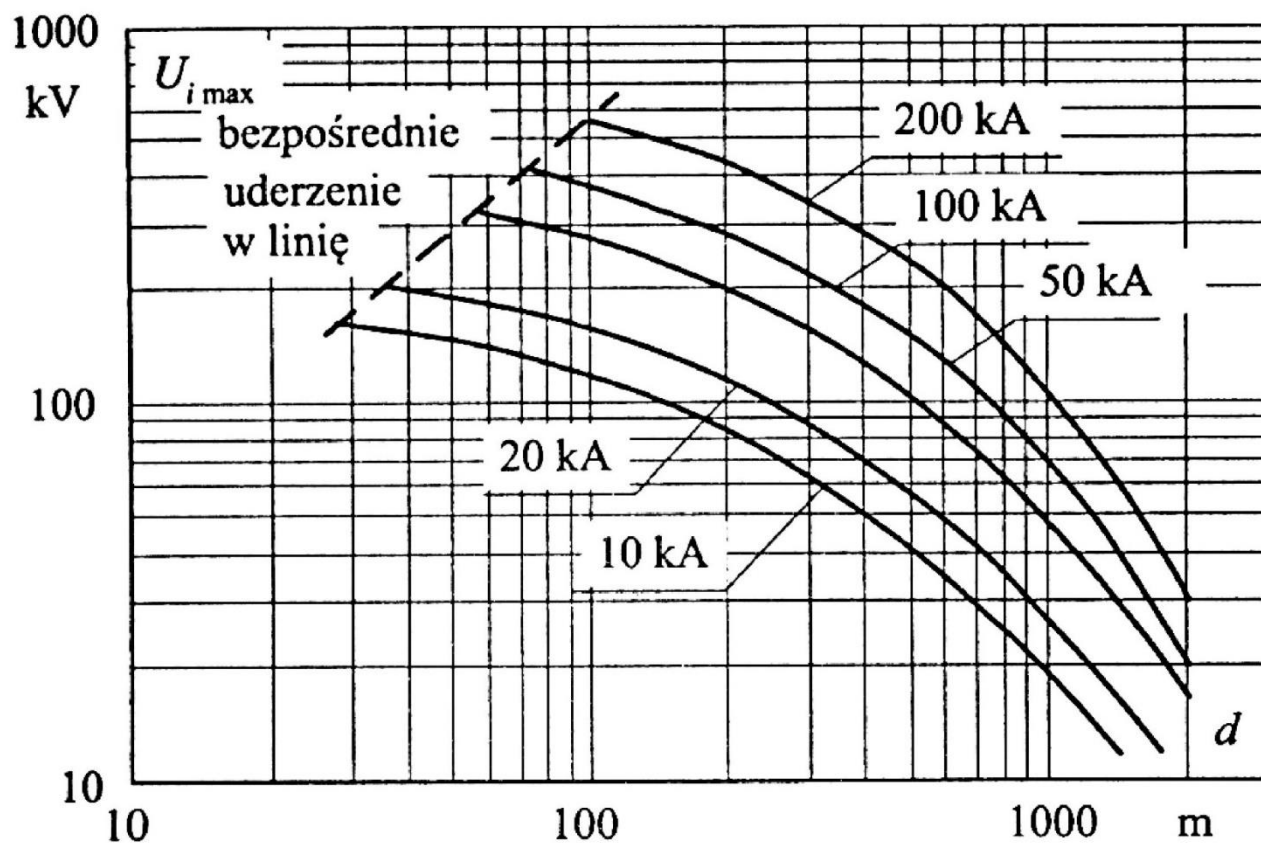


Powstawanie przepięć przy uderzeniu pioruna obok linii:

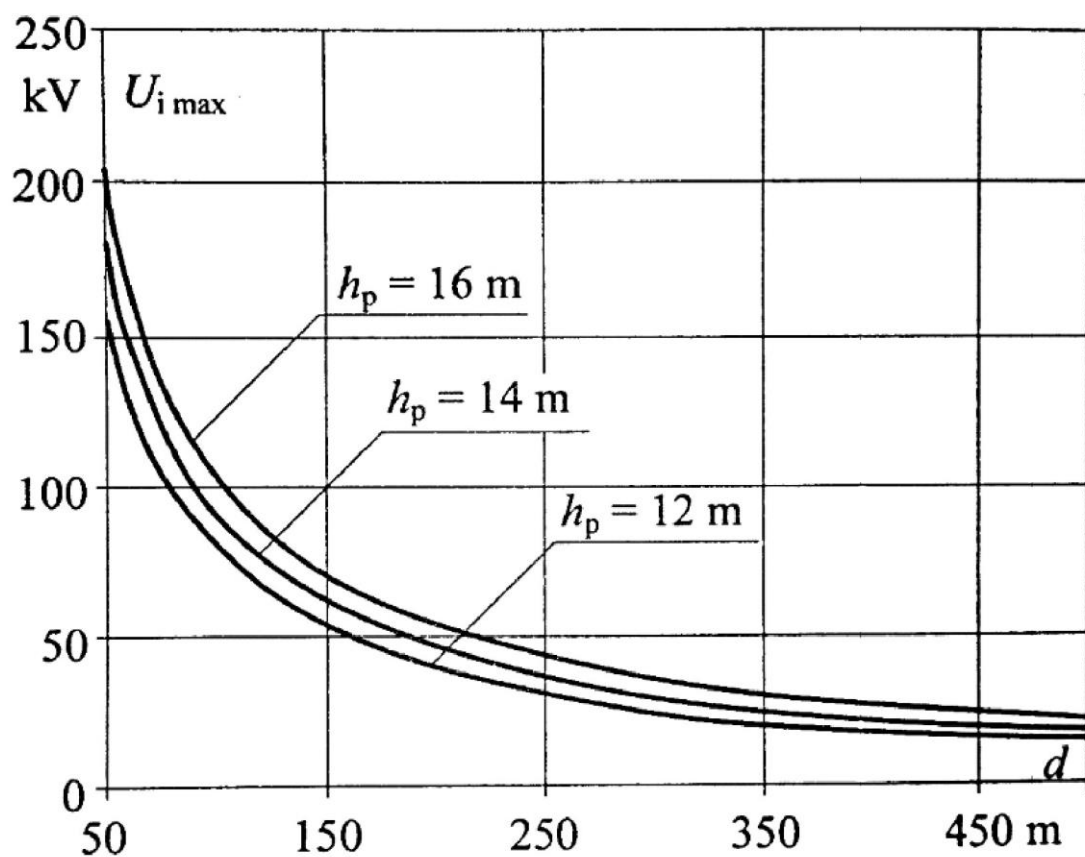
- składowa przepięcia indukowanego spowodowana zwarcie pola  $E_0$  przez wyładowanie piorunowe;

$E_0$  - pole elektryczne między chmurą a ziemią,

$E_i$  - pole elektryczne spowodowane ładunkiem na linii indukowanym przez  $E_0$

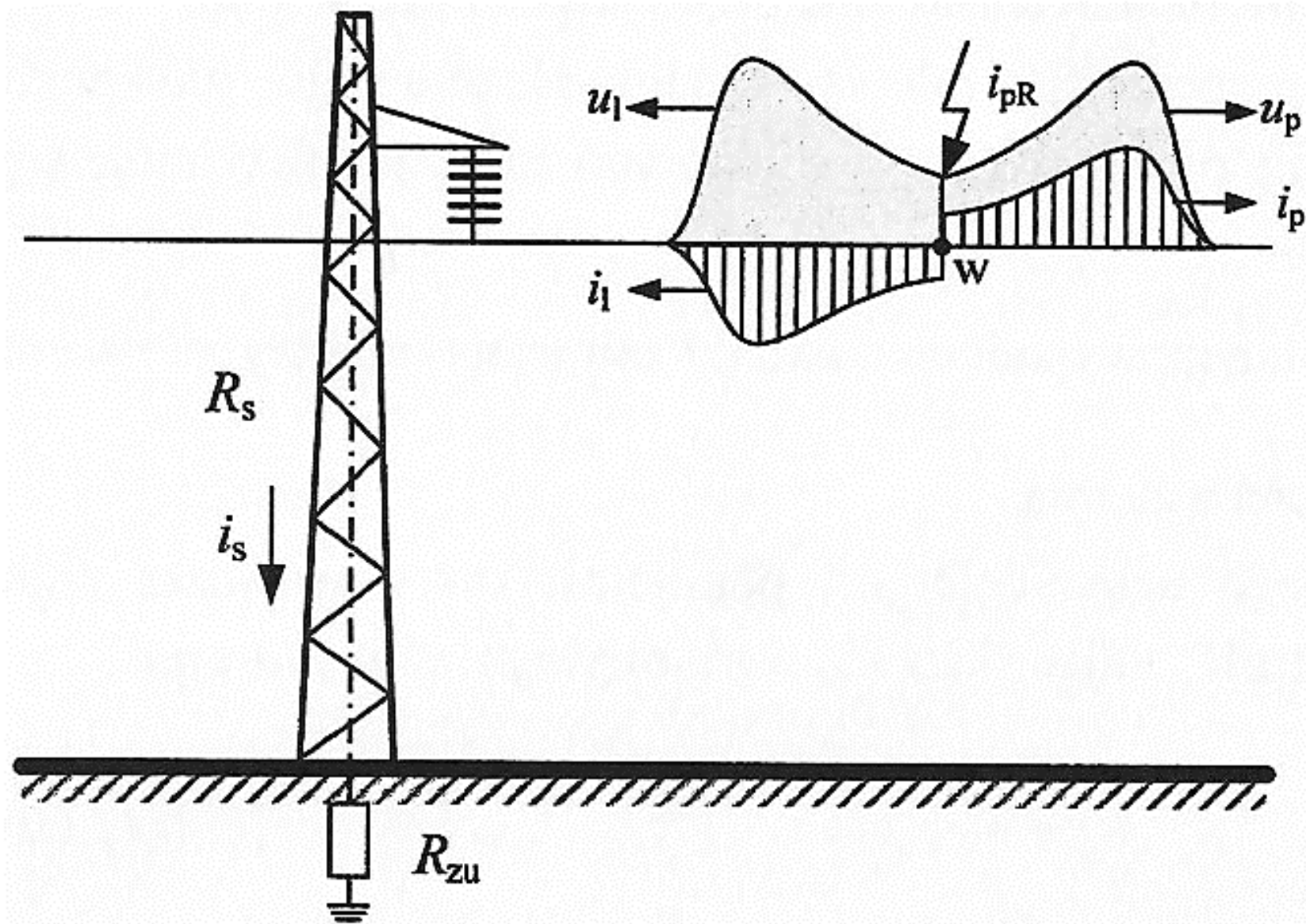


Wartości szczytowe przepięć indukowanych w liniach SN w zależności od odległości uderzenia pioruna dla różnych wartości jego prądu

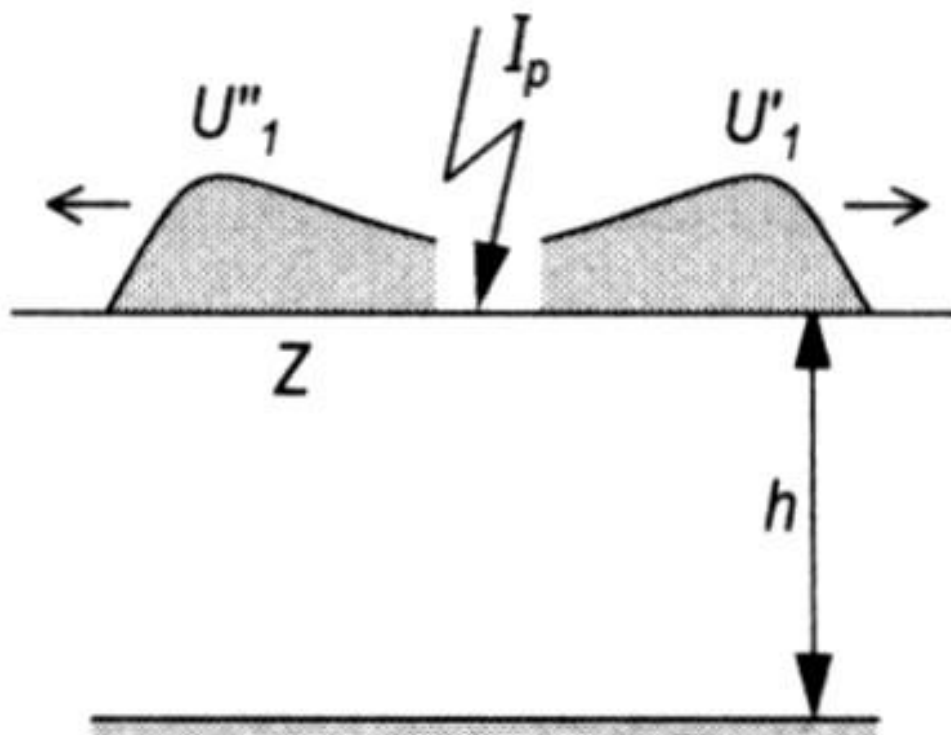


Wartości szczytowe przepięć indukowanych w przewodach linii napowietrznych w zależności od odległości uderzenia pioruna dla trzech różnych wysokości zawieszenia przewodów linii nad ziemią

## 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

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

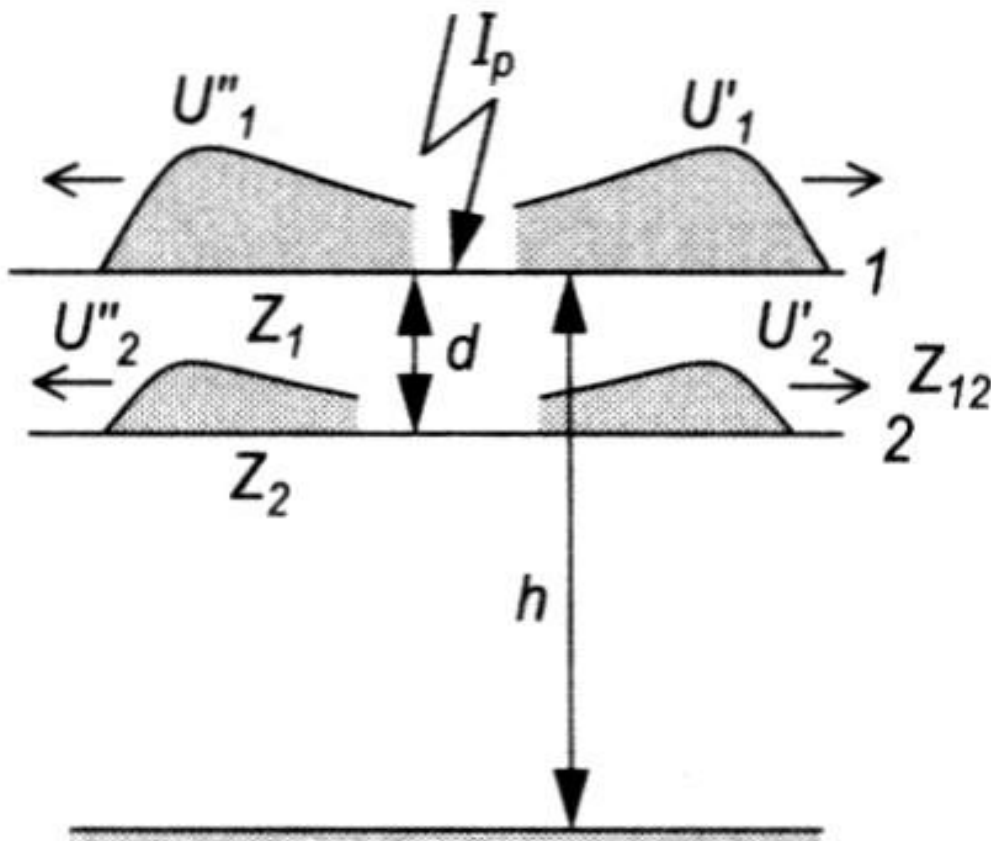
dla:

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

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

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

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

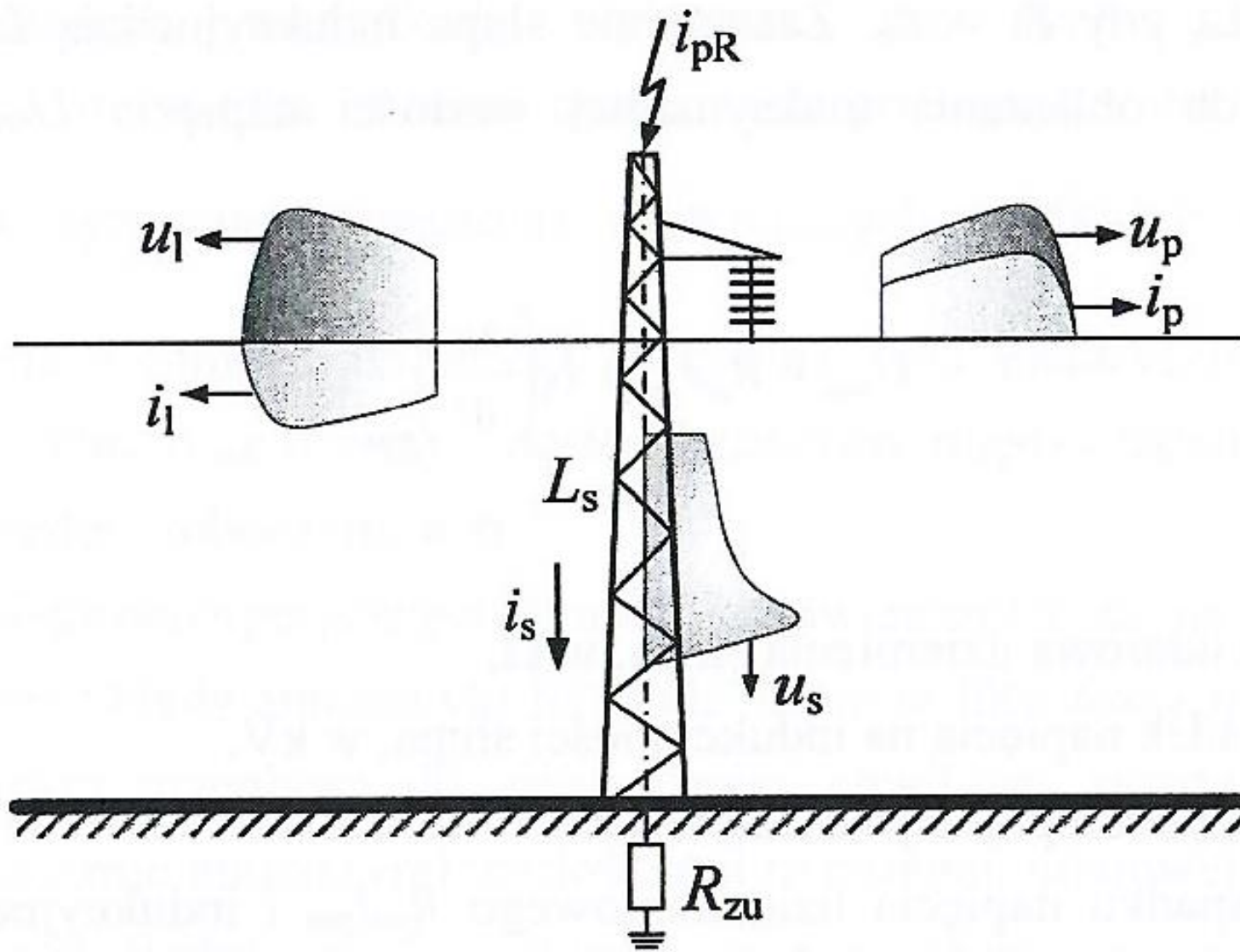
$$k = \frac{Z_{12}}{Z_1} \approx \frac{\ln \frac{2h}{a}}{\ln \frac{2h}{r}}$$

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

Powstawanie przebiegów przy uderzeniu pioruna w przewód odgromowy linii napowietrznej;

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

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



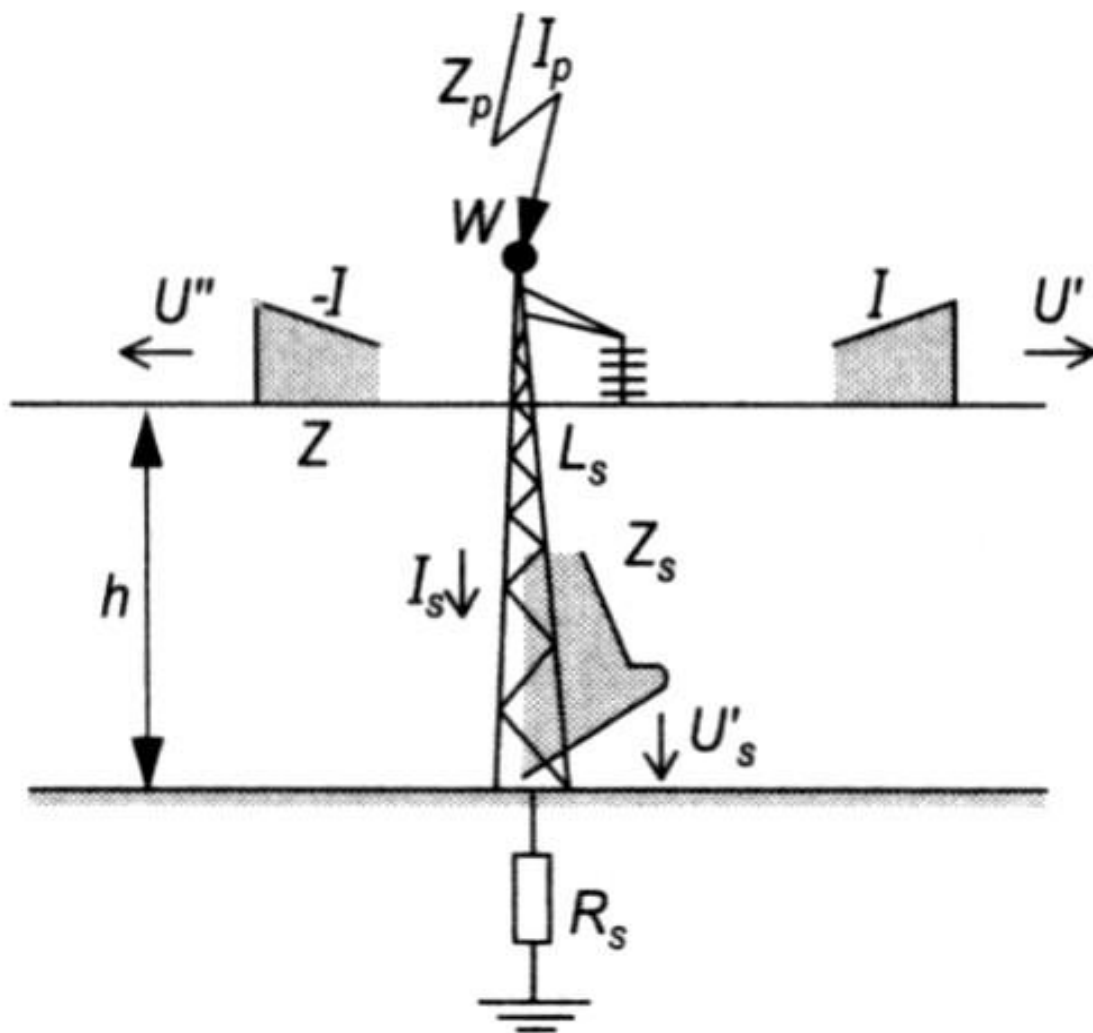
Powstawanie przepięć przy uderzeniu pioruna w słup przewodzący bez przewodu odgromowego;

$L_s$ ,  $R_{zu}$  - 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



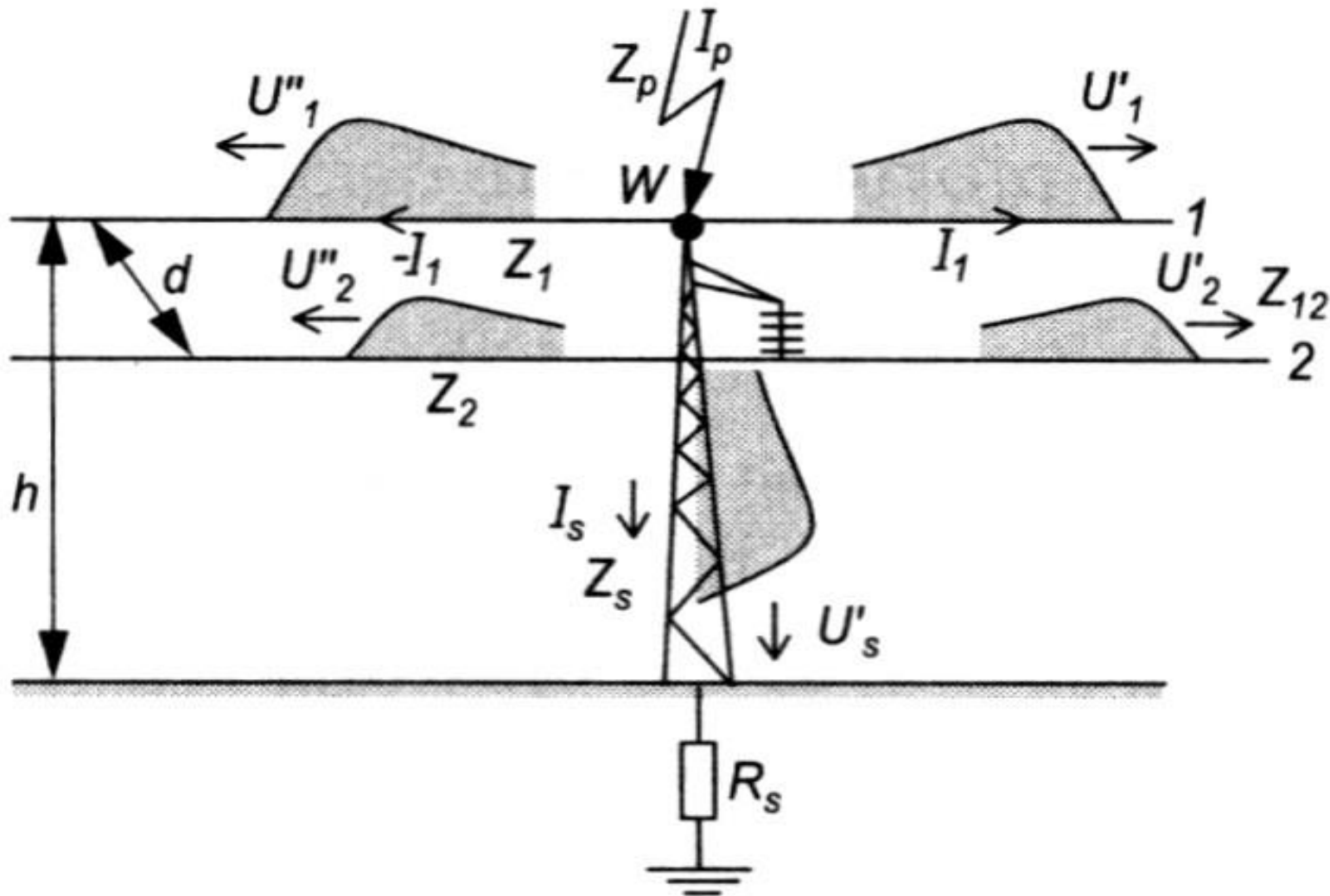
Sumowanie rezystancyjnych i indukcyjnych maksymalnych spadków napięcia jest uzasadnione dla idealnego kształtu impulsu przebiegowego, w którym maksymalna stromość prądu i wartość szczytowa pojawiają się w przybliżeniu w tym samym momencie, a zaniedbanie małego przemieszczenia oznacza przeszacowanie zagrożenia.

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:

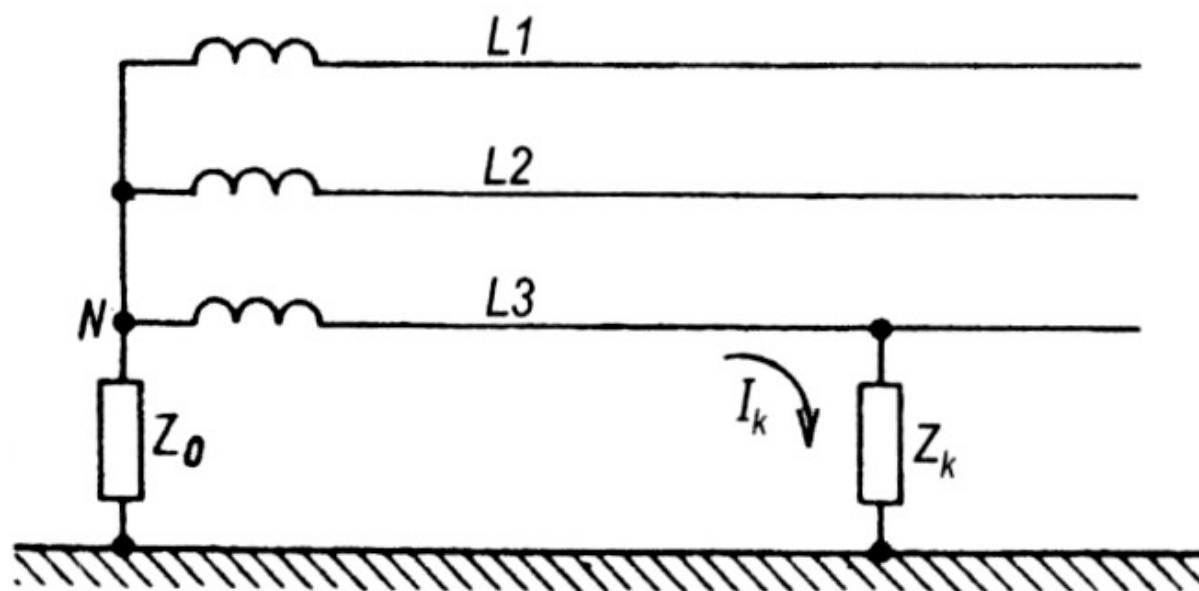
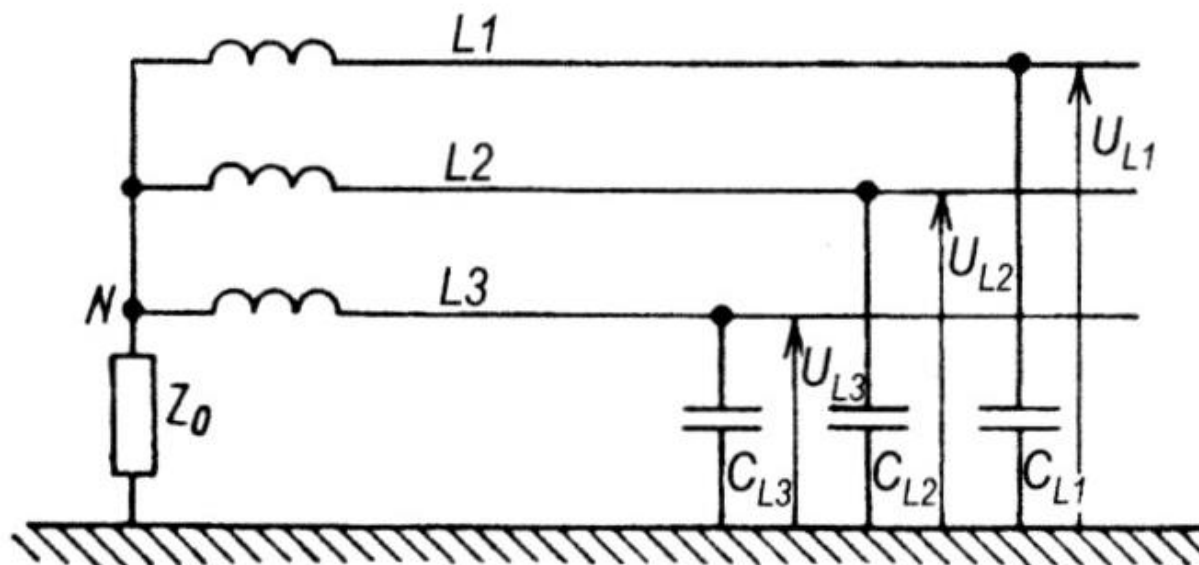
$$U_{12} = (1 - k) U_w$$

gdzie:

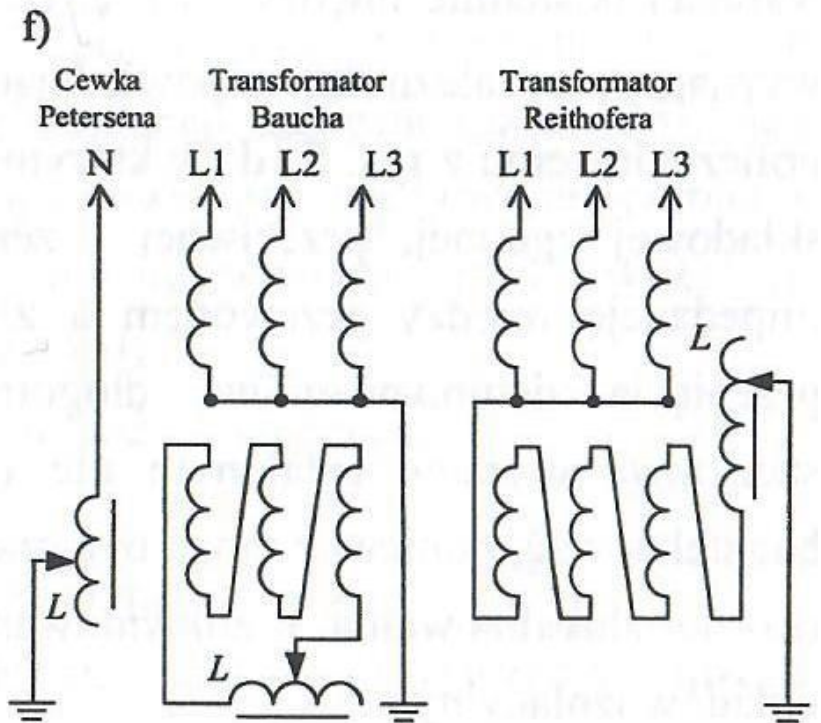
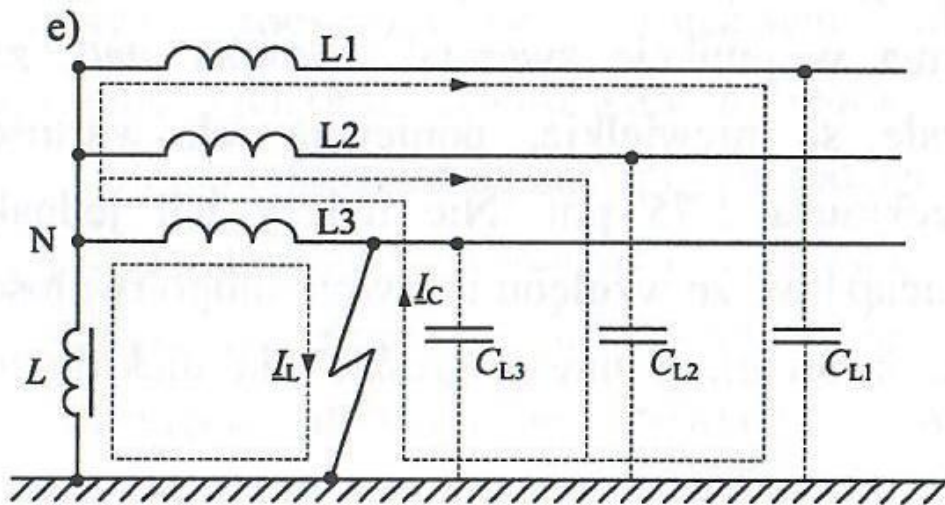
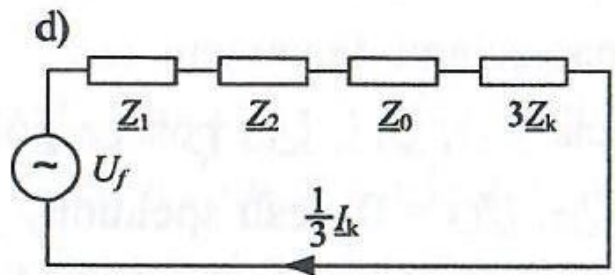
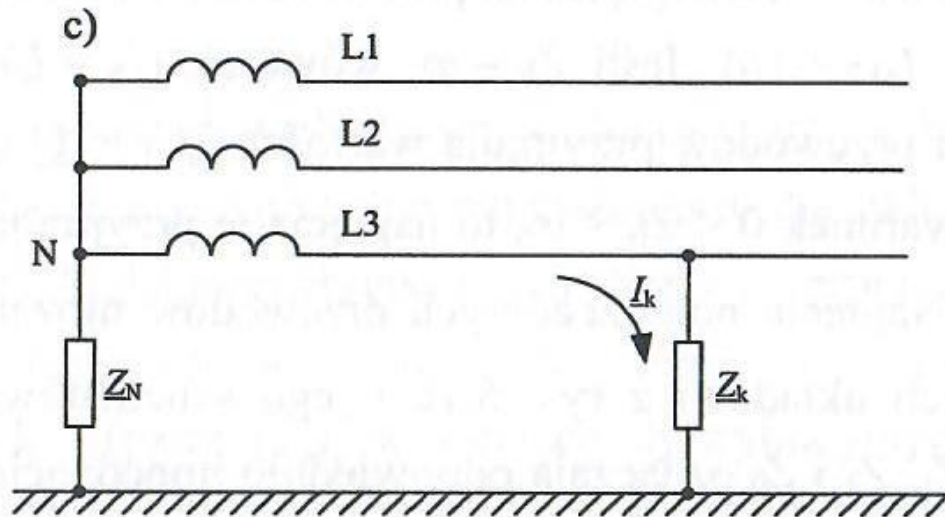
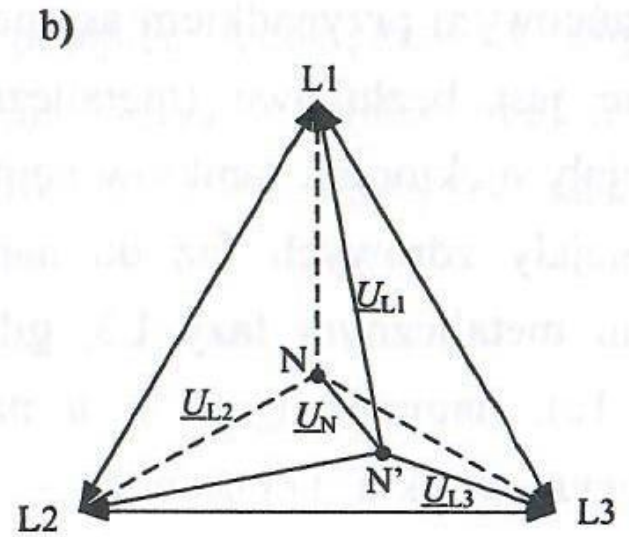
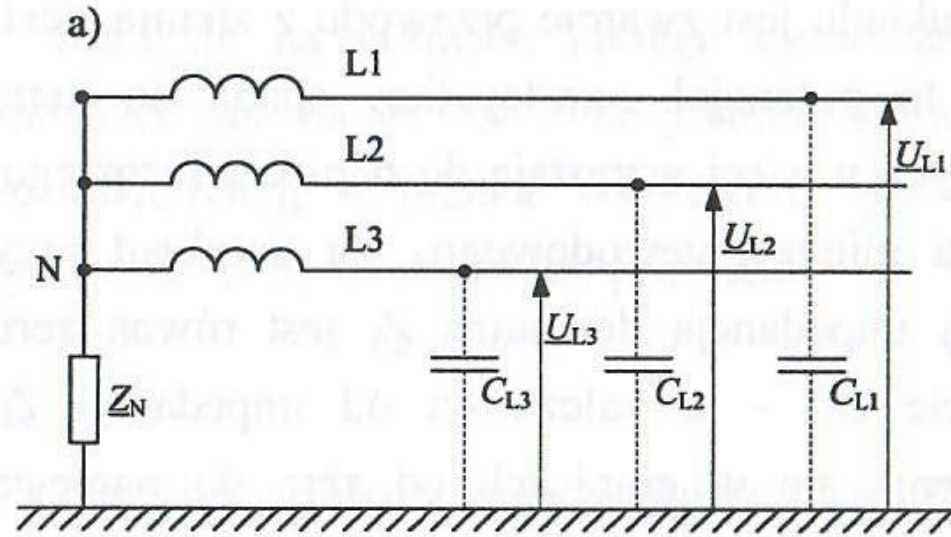
$$k = \frac{Z_{12}}{Z_1} \approx \frac{\ln \frac{2h}{a}}{\ln \frac{2h}{r}}$$

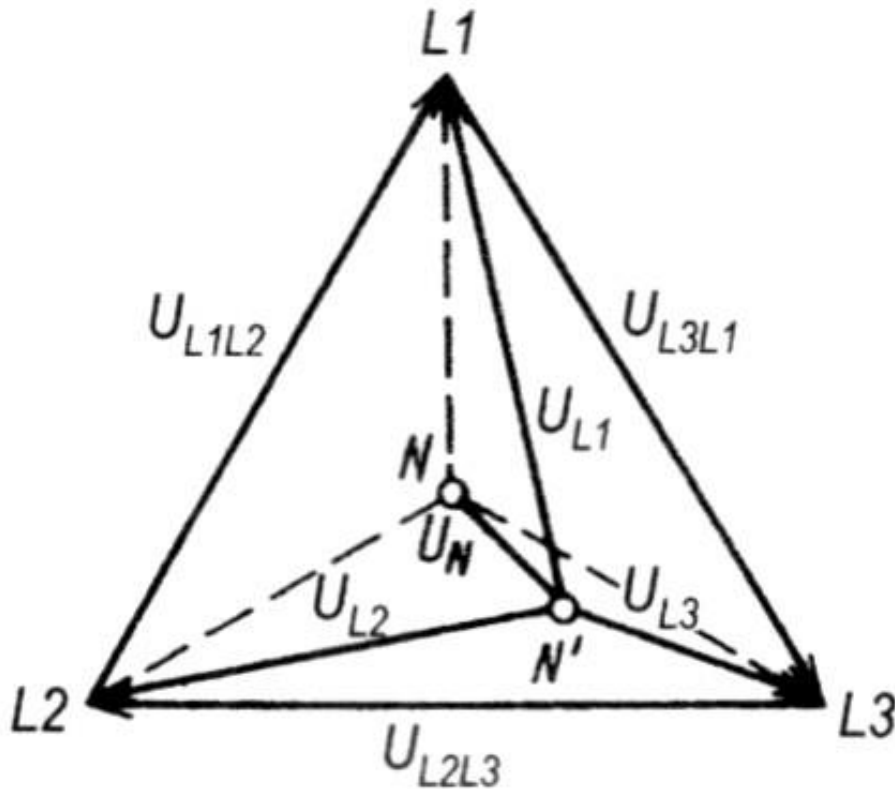
Można oczekiwać dodatkowej redukcji napięcia w związku ze zjawiskiem ulotu podczas propagacji fali wzdłuż przewodu uziemiającego.

## 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.

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

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

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

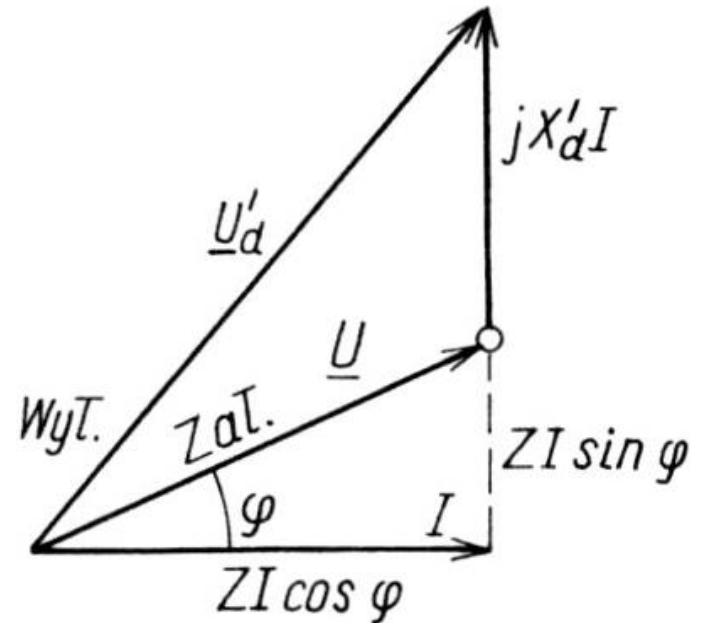
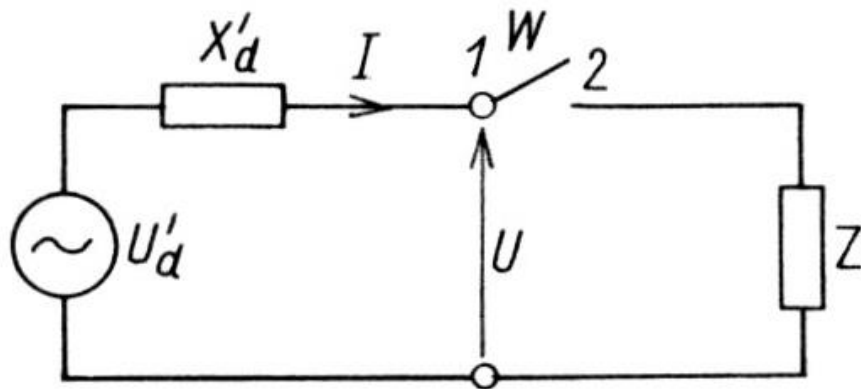
W przypadku izolowanego punktu neutralnego sieci:

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



## 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:

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

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

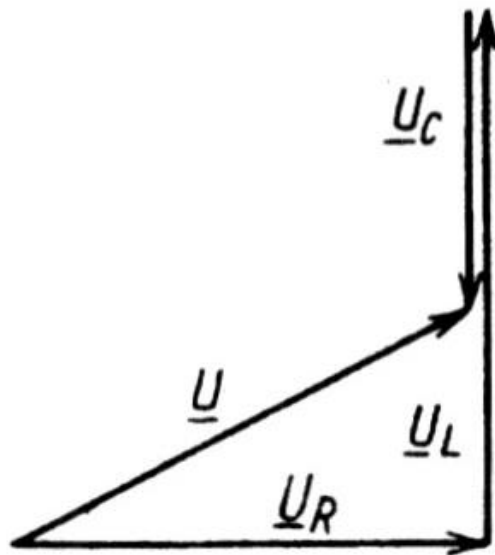
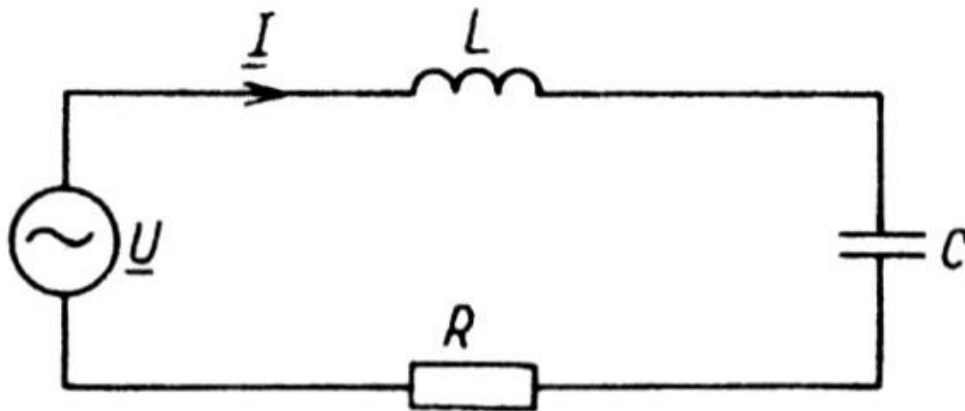
$$v = 300 \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

otrzymujemy:

$$k_d = 1,24$$

## Przebiegi wewnętrzne dorywcze rezonansowe

### Przebiegi przy rezonansie szeregowym w obwodzie liniowym



Ilustracja przebieg rezonansowych;  
układ i wykres wskazowy

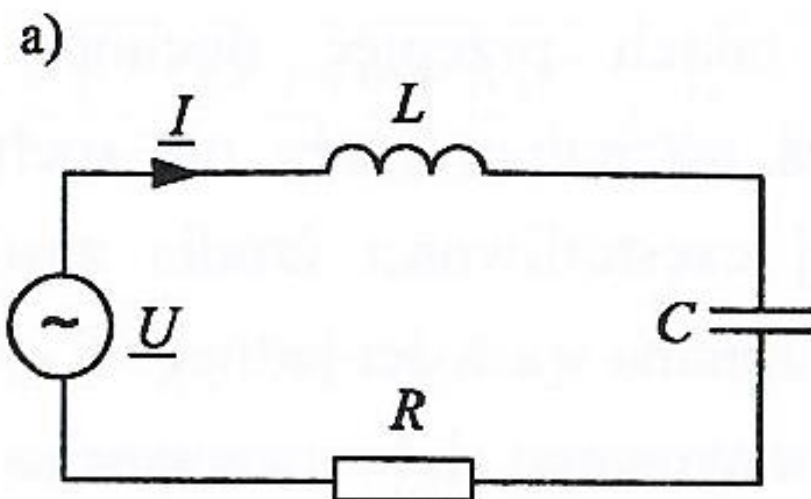
warunek rezonansu:

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

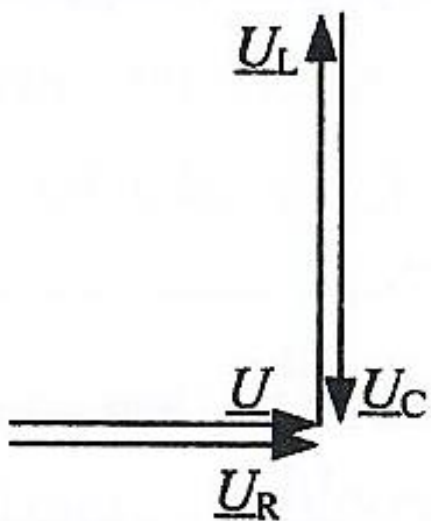
współczynnik przebieg:

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

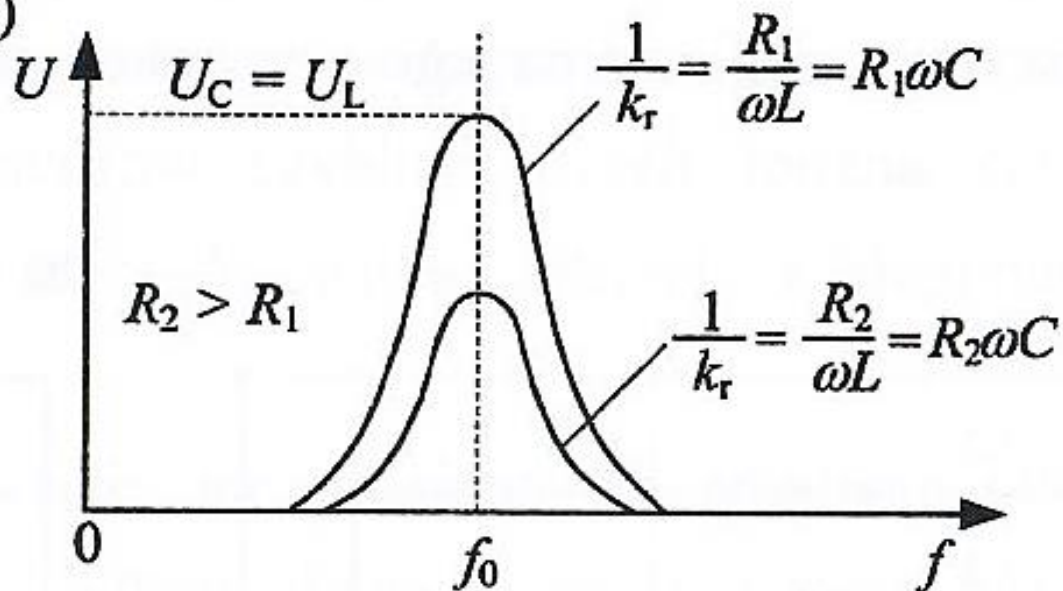
$k_r$  może dochodzić do 3



b)



c)

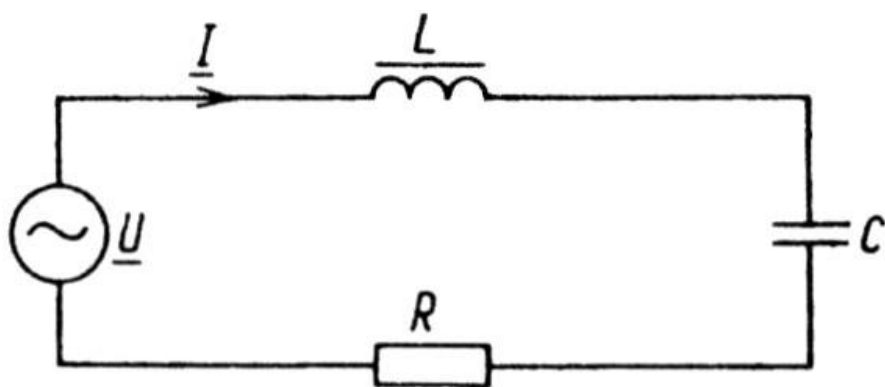


Ilustracja idealnego rezonansu napięć:

a) układ elektryczny,

b) wykres wskazowy,

c) charakterystyka częstotliwościowa napięcia.

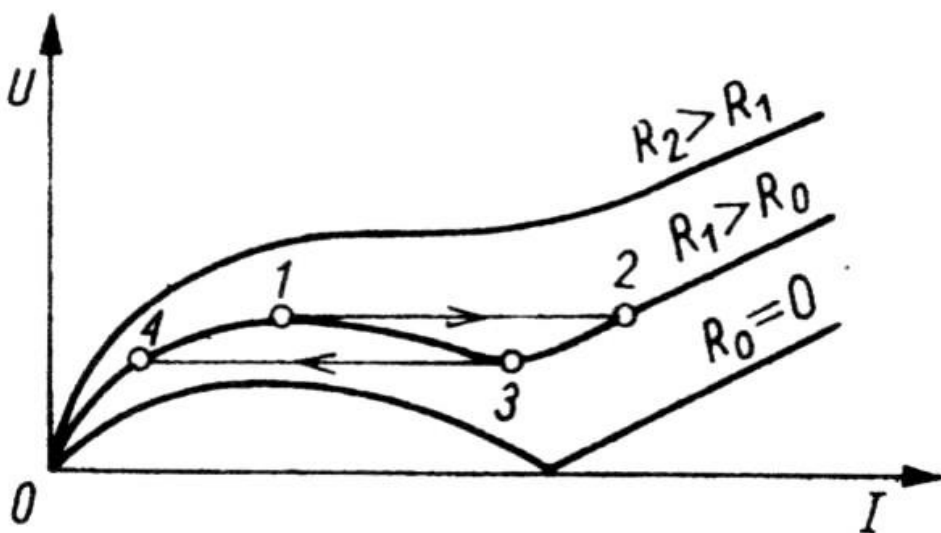
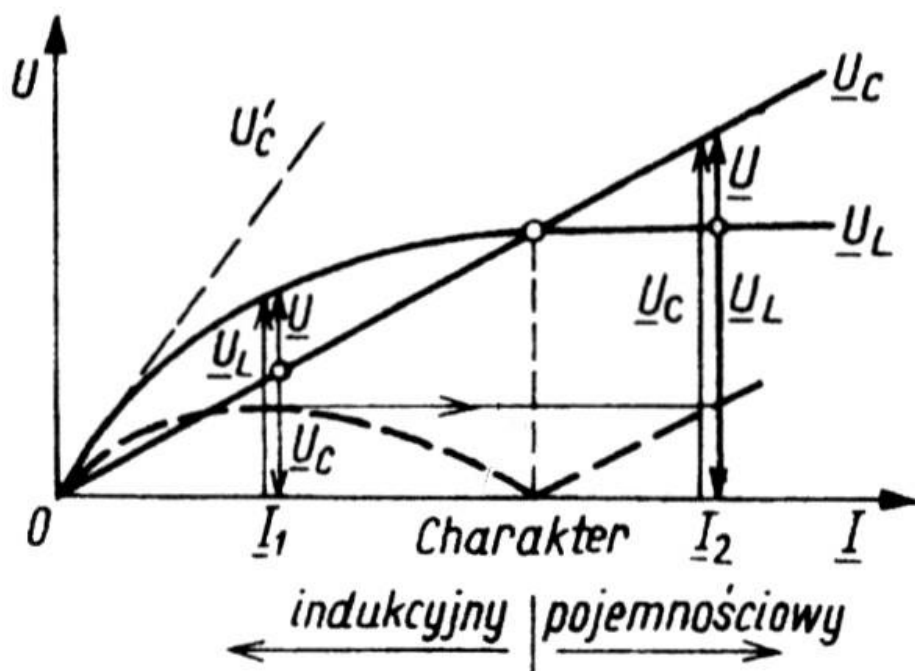


## Przebiegi ferrerezonansowe

$L$  - element nieliniowy  
(nasycający się rdzeń)

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

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



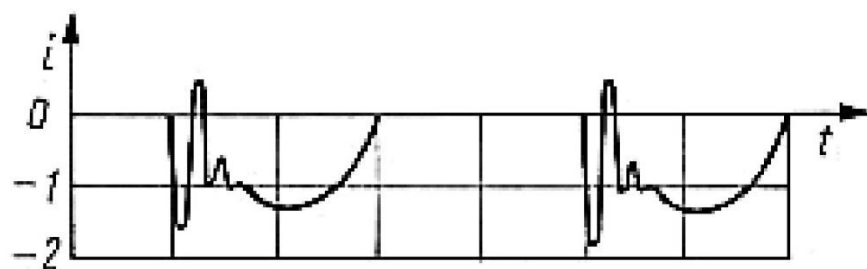
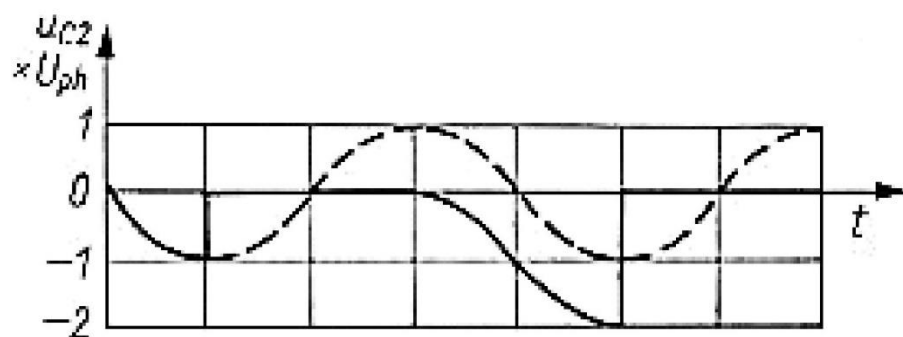
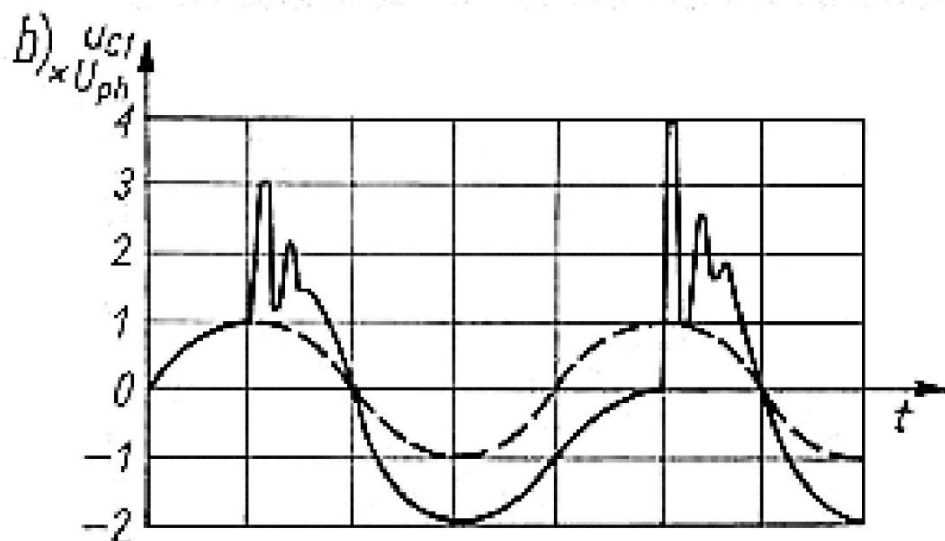
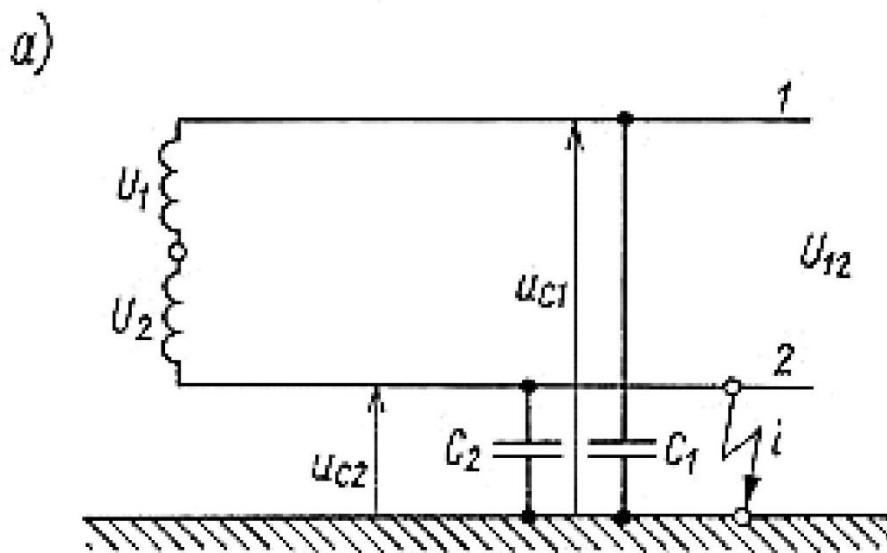
Ilustracja przebiegów  
ferrerezonansowych;  
układ i charakterystyki

## Przebiegi wewnętrzne łączeniowe awaryjne

### Przebiegi przy przerywanym zwarciu z ziemią

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

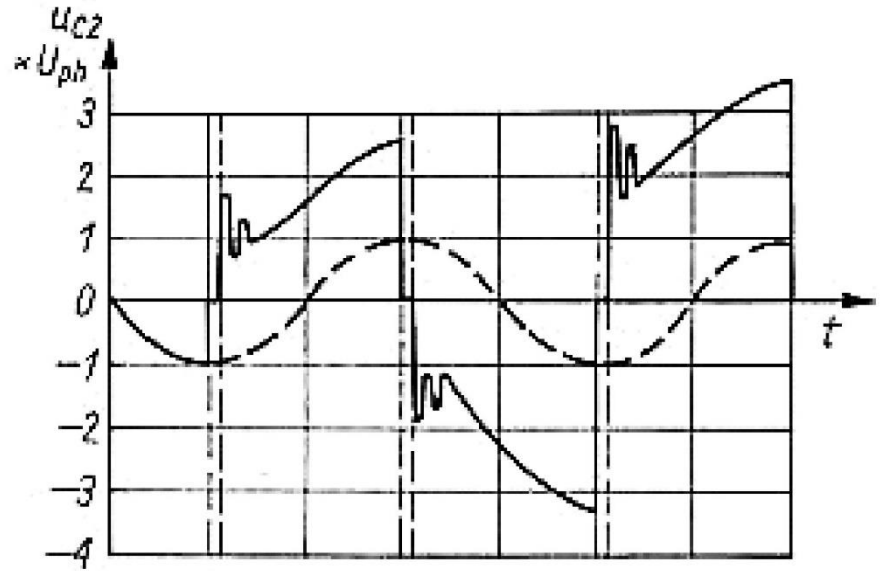
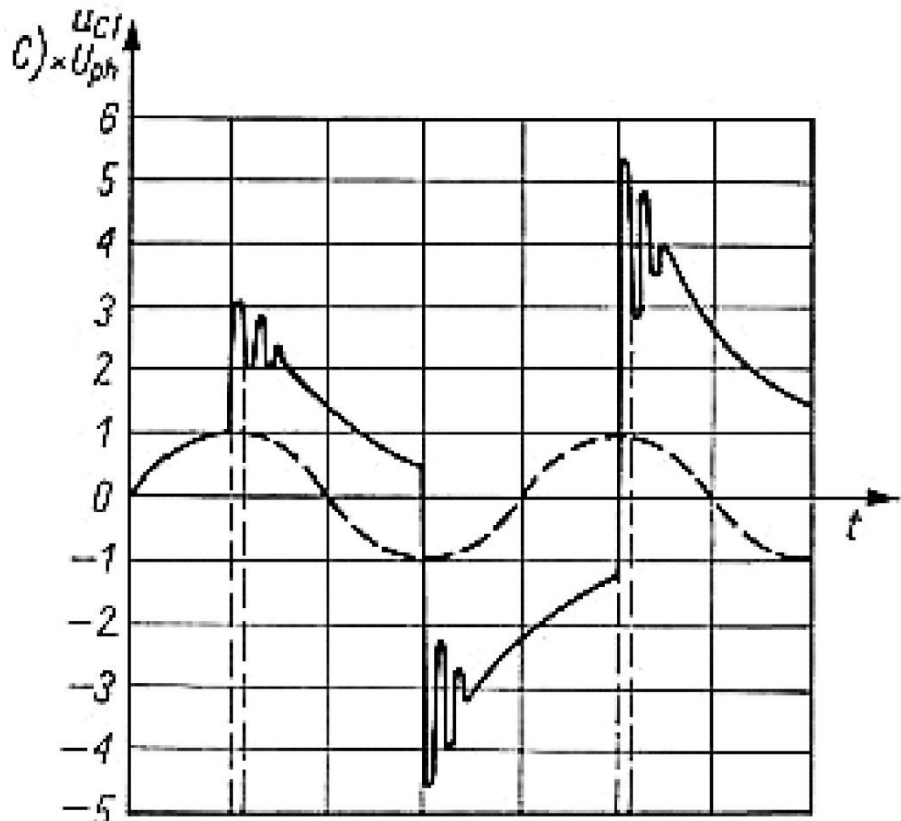
- wersja Petersa i Slepiana, w której zakłada się, że łuk jest przerywany, gdy wolnozmienna składowa prądu zwarcia przechodzi przez zero;
- wersja Petersena, w której zakłada się, że łuk jest przerywany, gdy szybkozmienna (oscylacyjna) składowa prądu zwarcia przechodzi przez zero.



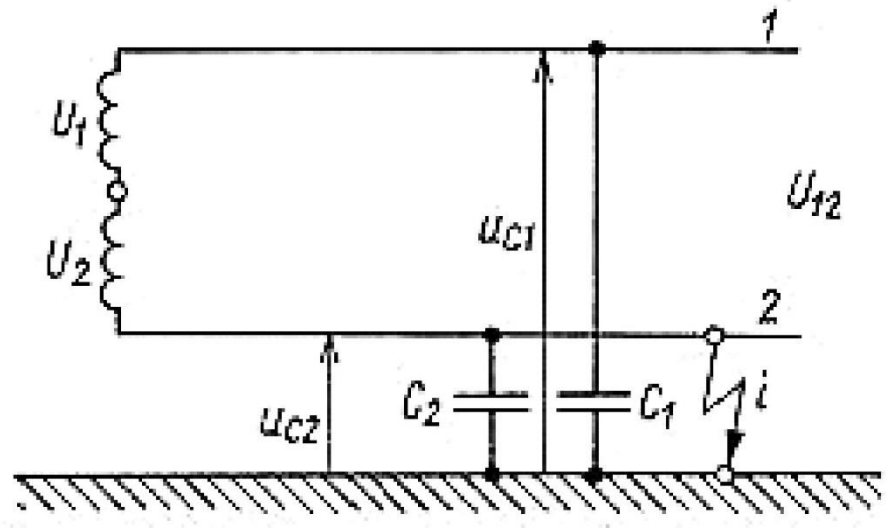
Przykład powstawania i rozwoju przebiegów zgodnie z mechanizmem Petersa i Slepiana:

a) schemat układu,

b) przebiegi napięcia i prądu.



a)



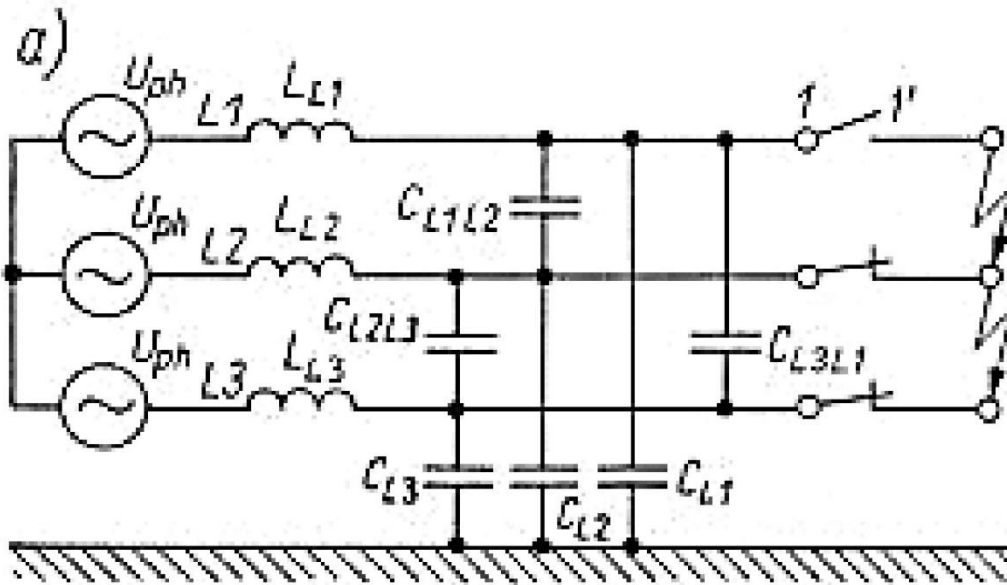
Przykład powstawania i rozwoju przebiegów zgodnie z mechanizmem Petersena:

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

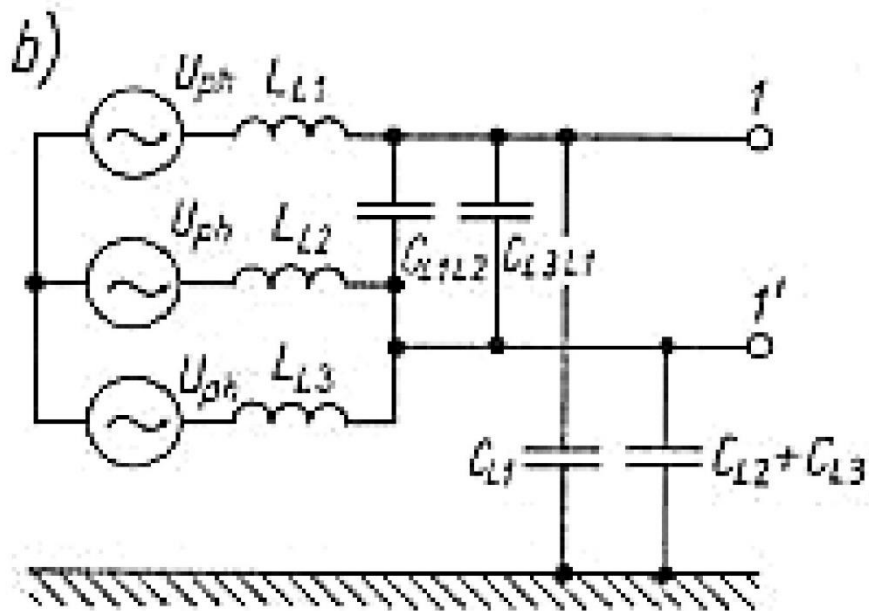


# Przebiegi wewnętrzne łączeniowe manewrowe

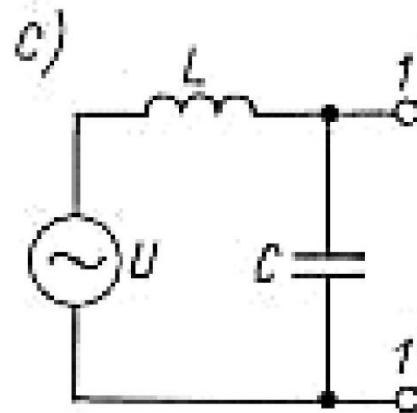
## Przebiegi przy wyłączaniu prądów zwarciovych



$$C_{L1} = C_{L2} = C_{L3} = C_z \quad C_{L1L2} = C_{L2L3} = C_{L3L1} = C_p$$



$$L_{L1} = L_{L2} = L_{L3} = L_{ph}$$



$$U = \frac{3}{2} U_{ph}$$

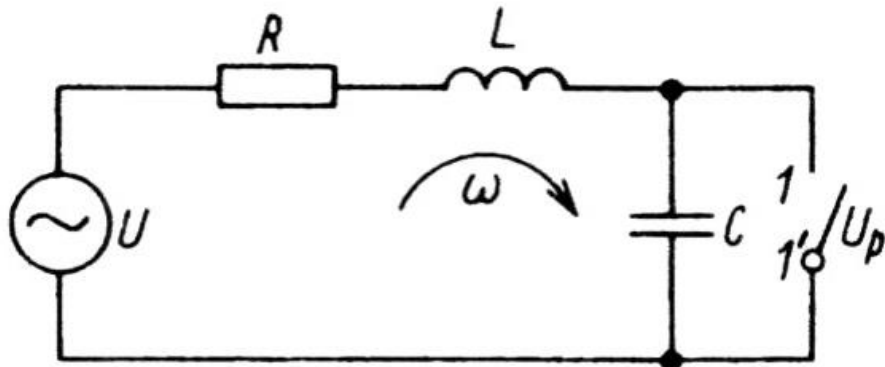
$$L = \frac{3}{2} L_{ph}$$

$$C = \frac{2}{3} C_z + 2C_p$$

Schematy układu ze zwarcie na stykach łącznika:

- a) schemat pełny,
- b) schemat częściowo uproszczony,
- c) schemat równoważny, obwód 1-fazowy.

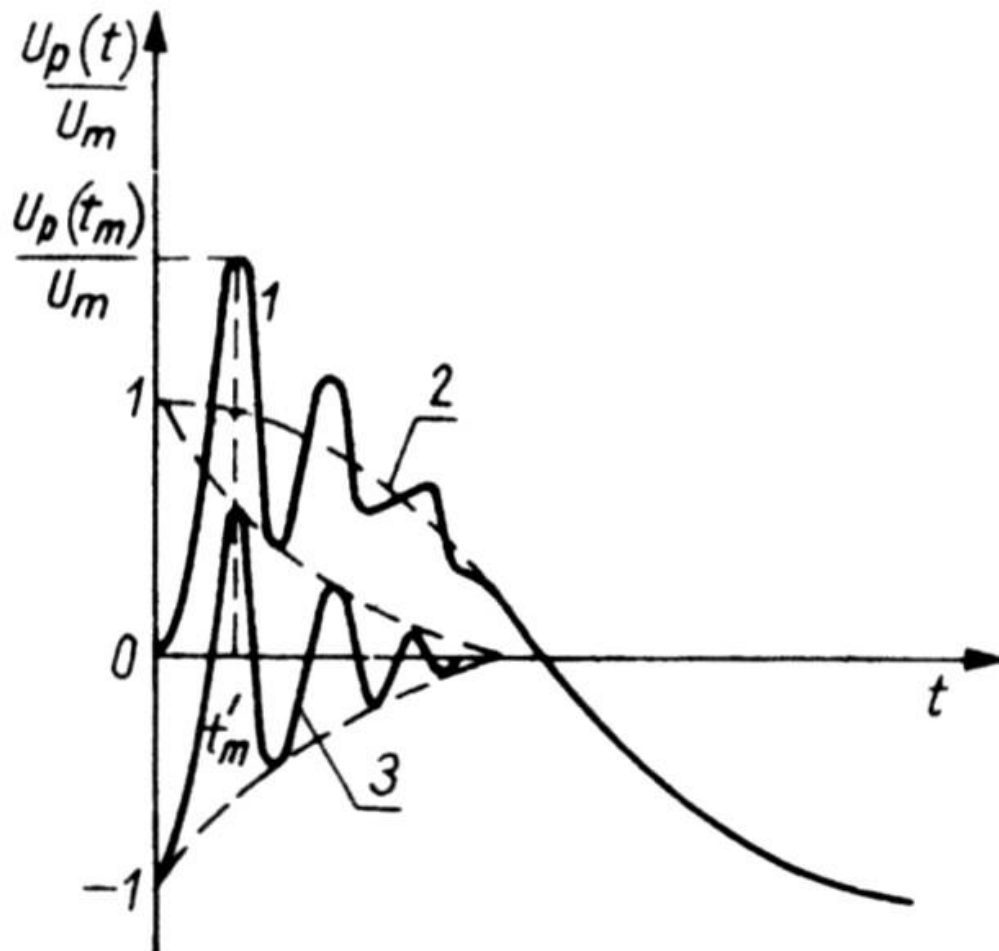
## Obwód jednoczęstotliwościowy



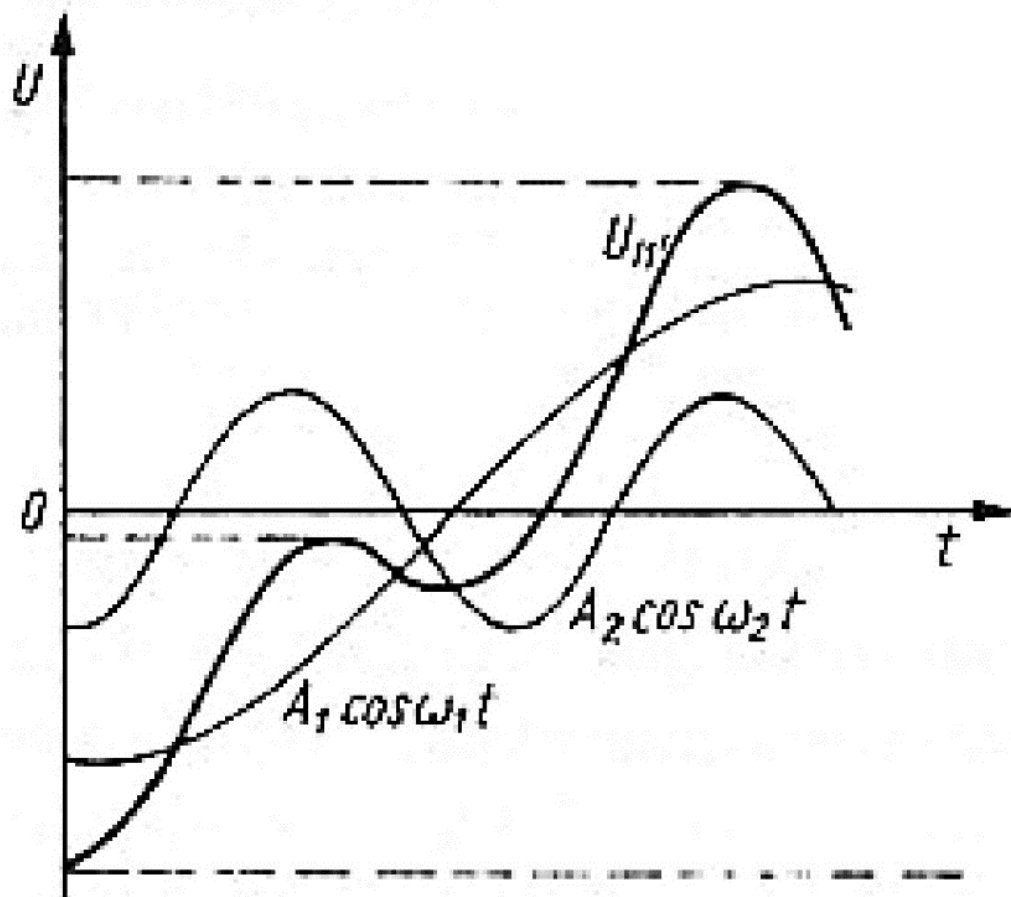
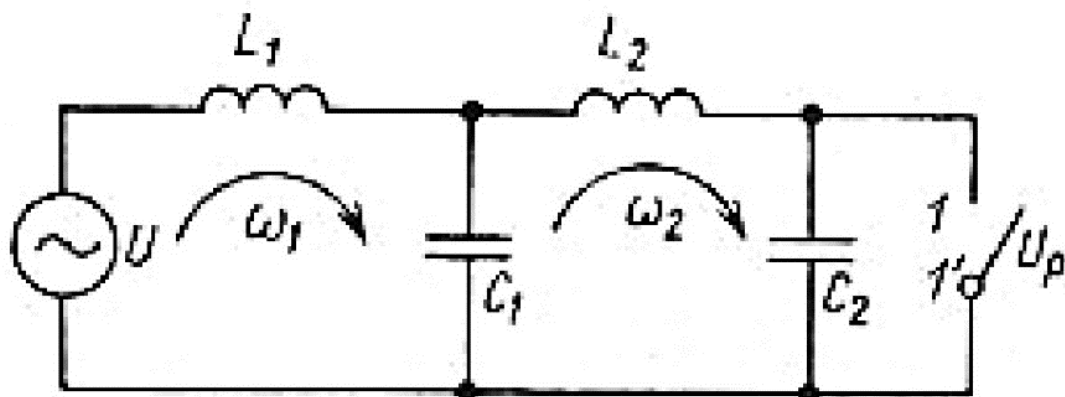
Otwarcie łącznika w chwili przejścia napięcia źródła przez maksimum:

- 1 - przebieg napięcia powrotnego;
- 2 - składowa podstawowa 50 Hz;
- 3 - składowa przejściowa o pulsacji:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$



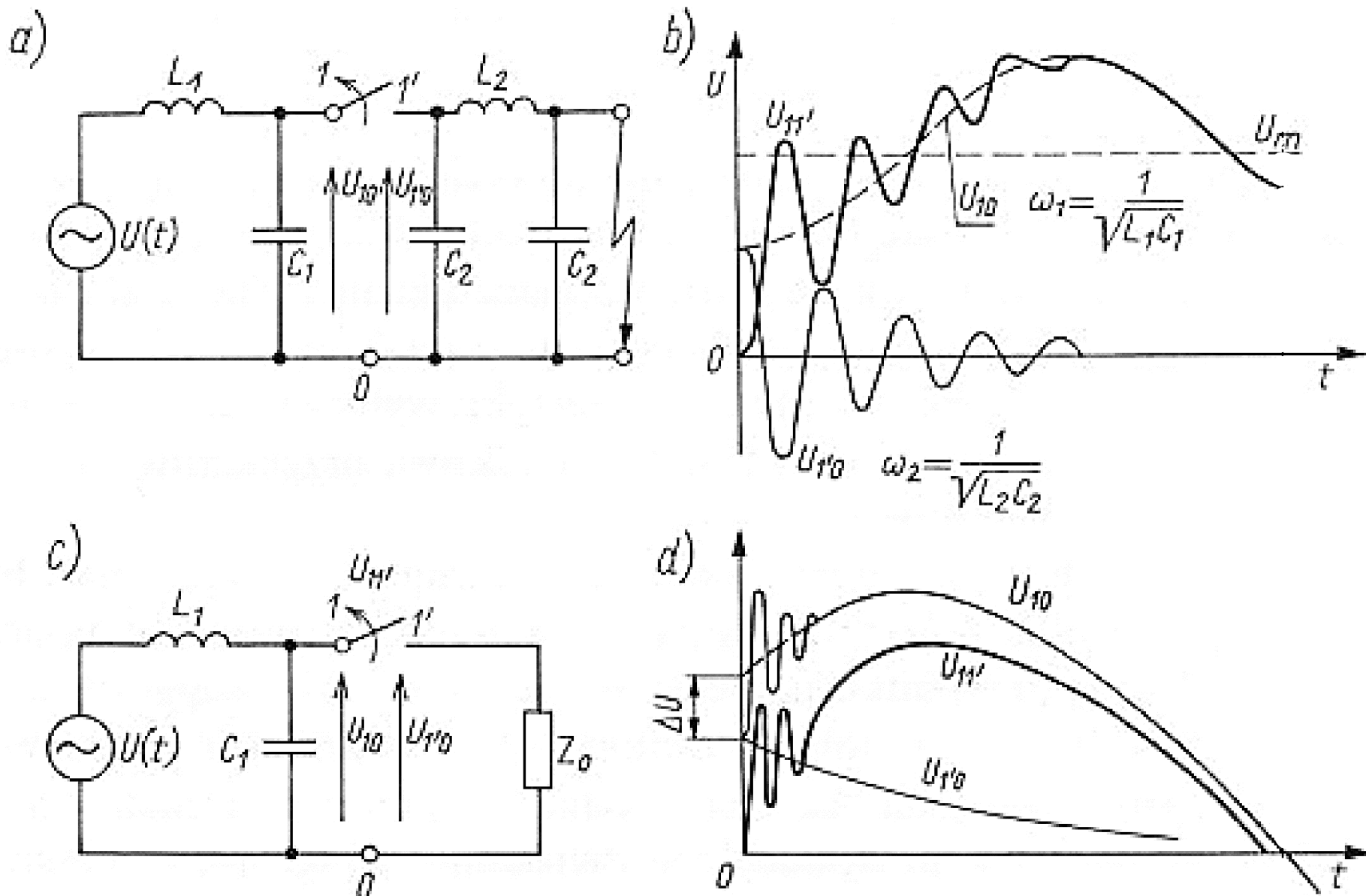
## Obwód dwuczęstotliwościowy



Otwarcie łącznika  
w obwodzie  
dwuczęstotliwościowym:

$U_{11'}$  - przebieg napięcia  
na otwartym  
łączniku, jako sumy  
składowych  
o pulsacjach  $\omega_1$  i  $\omega_2$

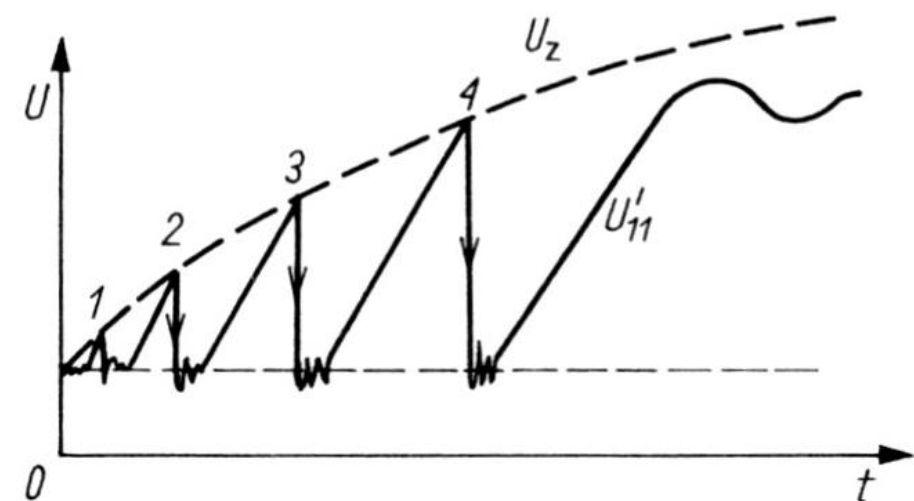
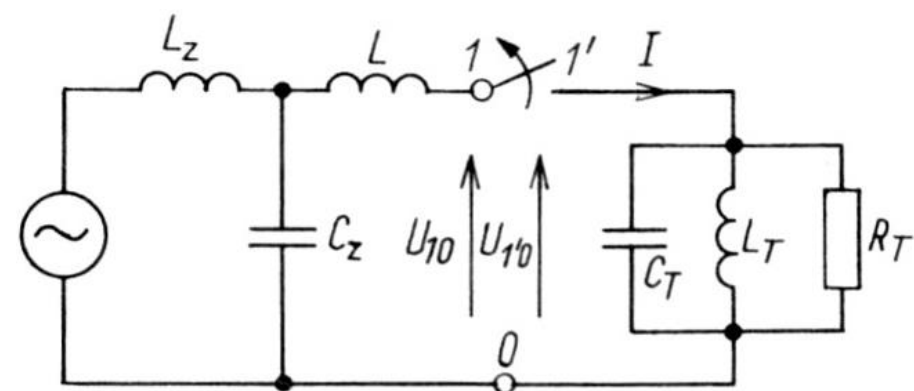
## Wyłączenie prądu odległego zwarcia lub prądu roboczego



Schematy zastępcze sieci i przebiegi napięć:

- wyłączenie prądu odległego zwarcia,
- przebiegi napięć dla sieci w punkcie a),
- wyłączenie prądu roboczego,
- przebiegi napięć dla sieci w punkcie c).

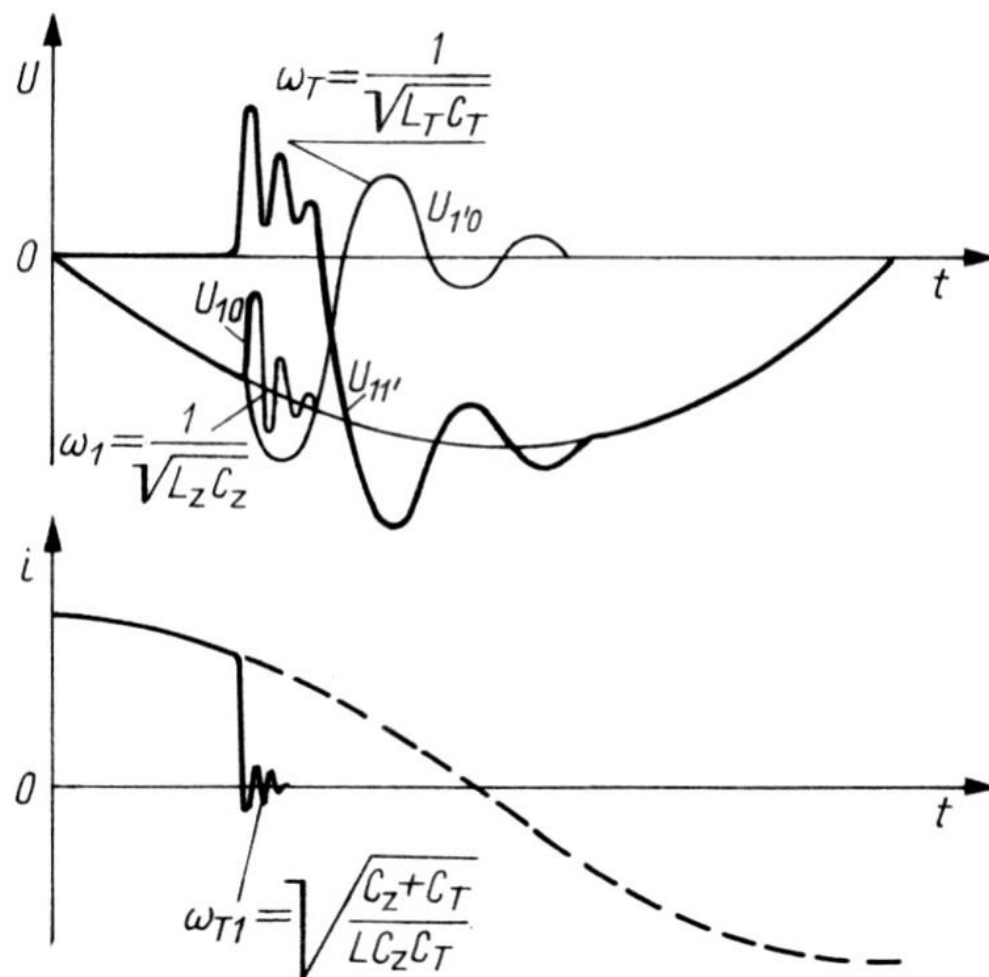
## Przebiegi przy wyłączaniu małych prądów indukcyjnych



Odłączanie transformatora nieobciążonego; schemat i przebiegi napięcia powrotnego przy ponownych zapłonach:

$U_z$  - charakterystyka zapłonowa;

1, 2, 3, 4 - kolejne zapłony łuku



Odłączanie transformatora nieobciążonego; przebiegi składowych napięcia powrotnego i prądu przerwanego

Przerwanie prądu przed naturalnym przejściem przez zero

Energia magnetyczna i elektryczna w chwili przerwania prądu:

$$W_m = \frac{L_T}{2} I_m^2 \sin^2 \psi$$

$$W_e = \frac{C_T}{2} U_m^2 \cos^2 \psi$$

$I_m$  i  $U_m$  - wartości szczytowe prądu i napięcia

$\psi$  - kąt fazowy przerwania prądu przed naturalnym przejściem przez zero

$L_T$ ,  $C_T$ ,  $R_T$  - parametry transformatora

Po przerwaniu prądu cała energia w pojemności transformatora:

$$\frac{L_T}{2} I_m^2 \sin^2 \psi + \frac{C_T}{2} U_m^2 \cos^2 \psi = \frac{C_T}{2} (U_{1'0})_m^2$$

Największa wartość napięcia na zaciskach transformatora wynosi:

$$(U_{1'0})_m = \sqrt{\frac{L_T}{C_T} I_m^2 \sin^2 \psi + U_m^2 \cos^2 \psi}$$

Współczynnik przebieg  $k_t$  w tym samym miejscu jest równy:

$$k_T = \frac{(U_{1'0})_m}{U_m} = \sqrt{\frac{L_T}{C_T} \left( \frac{I_m}{U_m} \right)^2 \sin^2 \psi + \cos^2 \psi}$$

Napięcie powrotne między otwartymi stykami łącznika wynosi:

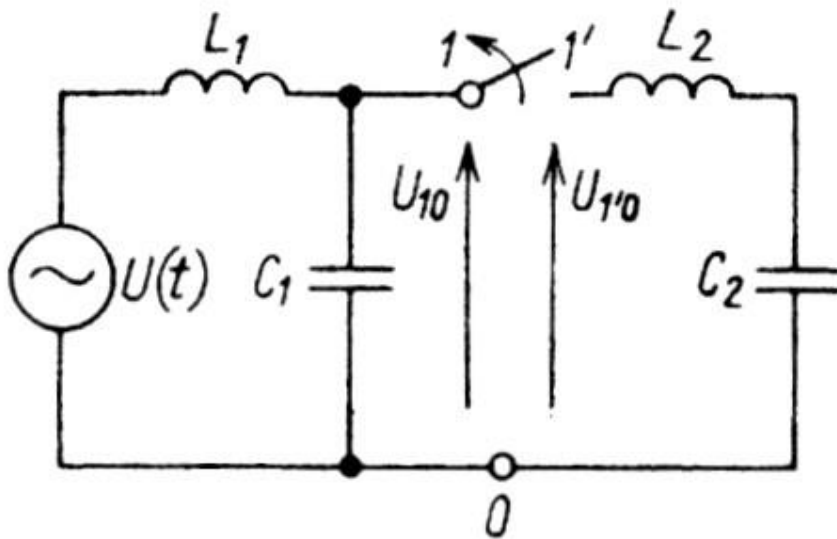
$$U_{11'}(t) = U_m \cos(\omega t + \psi) + \\ - \left( U_m \cos \psi \cos \omega_T t - I_m \sin \psi \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} \sin \omega_T t \right) e^{-\alpha \omega_T t}$$

gdzie:

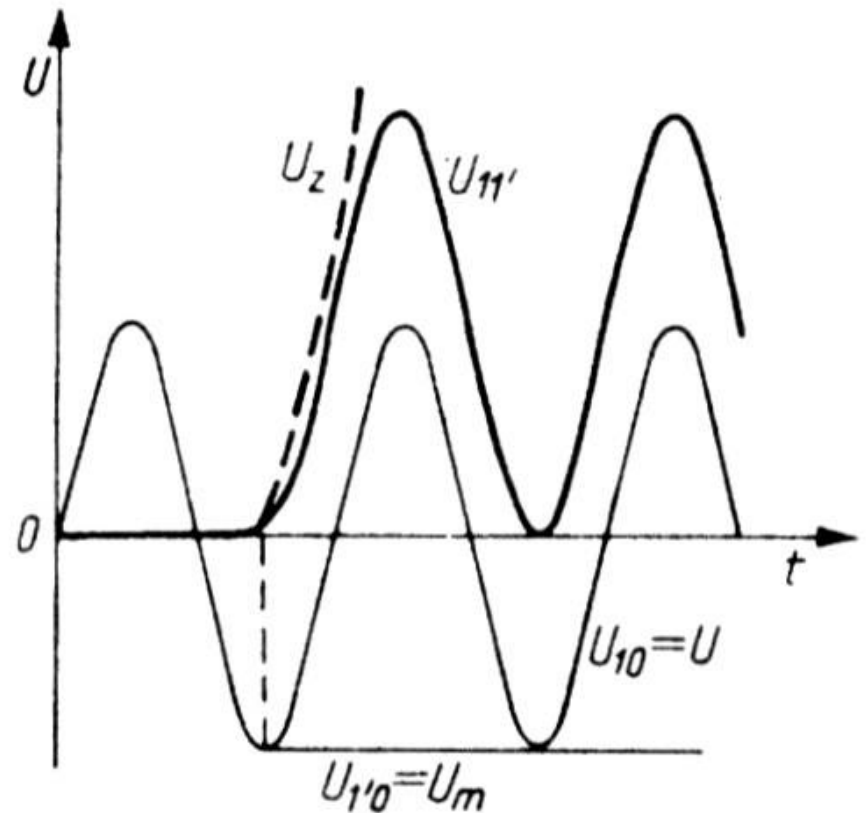
$$\alpha = \frac{\omega_T L_T}{2R_T}; \quad \omega_T = \frac{1}{\sqrt{L_T C_T}};$$

$\omega$  - pulsacja podstawowa ( $f = 50$  Hz).

## Przebiegi przy wyłączaniu prądów pojemnościowych



Obwód z odłączaną pojemnością zastępczą  $C_2$  od źródła dużej mocy



Przebiegi napięcia:

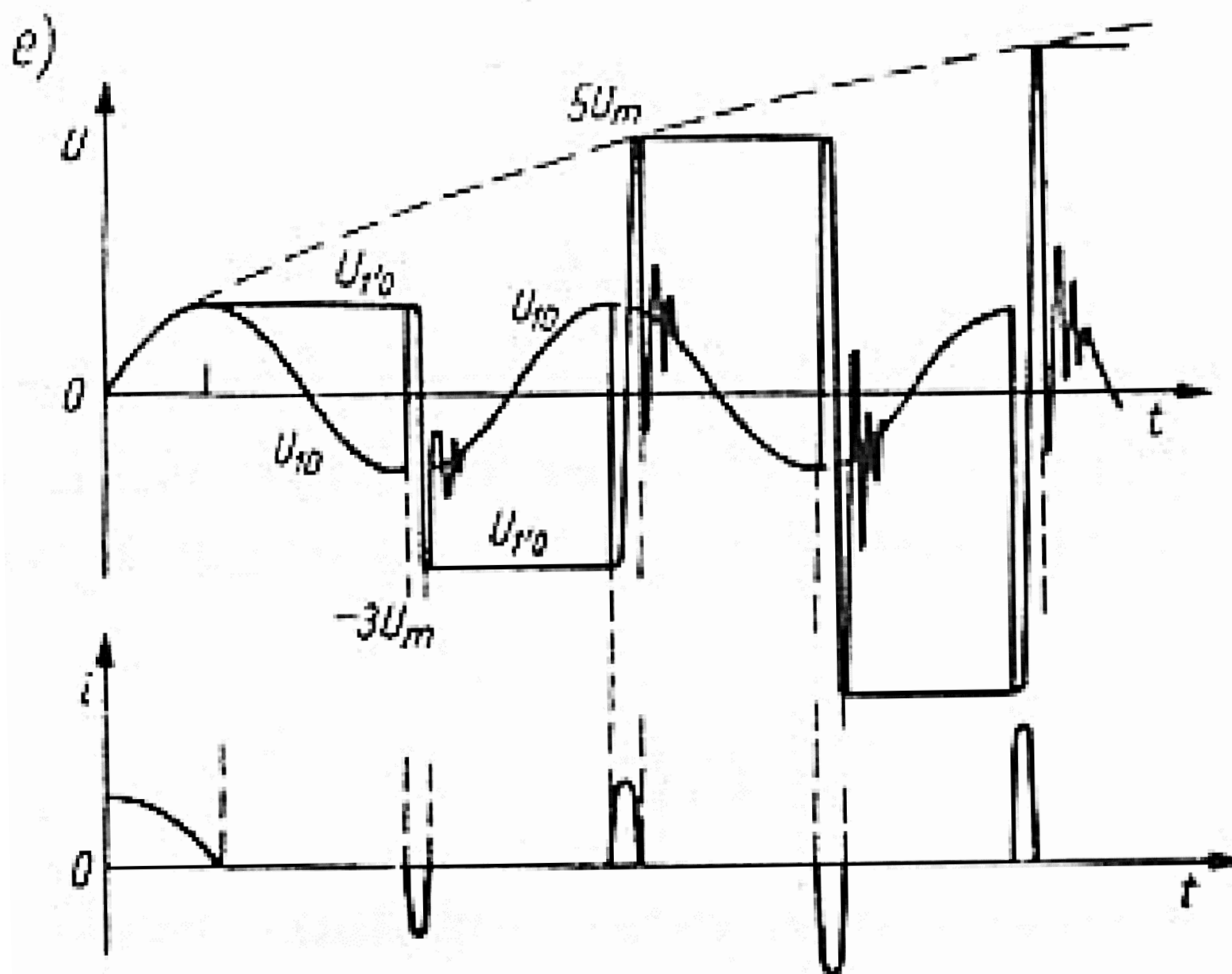
$U_z$  - charakterystyka zapłonowa wyłącznika,

$U_{10}$  - napięcie przed wyłącznikiem,

$U_{1'0}$  - napięcie za wyłącznikiem,

$U_{11'}$  - napięcie na otwartym wyłączniku.





## Wybrane znormalizowane poziomy wytrzymałości izolacji

$U_n$ kV	$U_{rm}$ kV	$U_{w \sim}$ kV	$U_{w \text{ piorun}}$ kV
6	7,2	20	60
10	12	28	75
15	17,5	38	95
20	24	50	125
30	36	70	170
110	123	230	550
220	245	460	950

$U_n$  - napięcie znamionowe

$U_{rm}$  - najwyższe napięcie robocze

$U_{w \sim}$  - napięcie wytrzymywane przemienne

$U_{w \text{ piorun}}$  - napięcie wytrzymywane piorunowe

wybrane znormalizowane poziomy wytrzymałości izolacji

$U_n$ kV	$U_{rm}$ kV	$U_{w \text{ łączen}}$ kV	$U_{w \text{ piorun}}$ kV
400	420	950	1300
500	525	1050	1425
750	762	1425	1950

$U_n$  - napięcie znamionowe

$U_{rm}$  - najwyższe napięcie robocze

$U_{w \text{ łączen}}$  - napięcie wytrzymywane łączeniowe

$U_{w \text{ piorun}}$  - napięcie wytrzymywane piorunowe