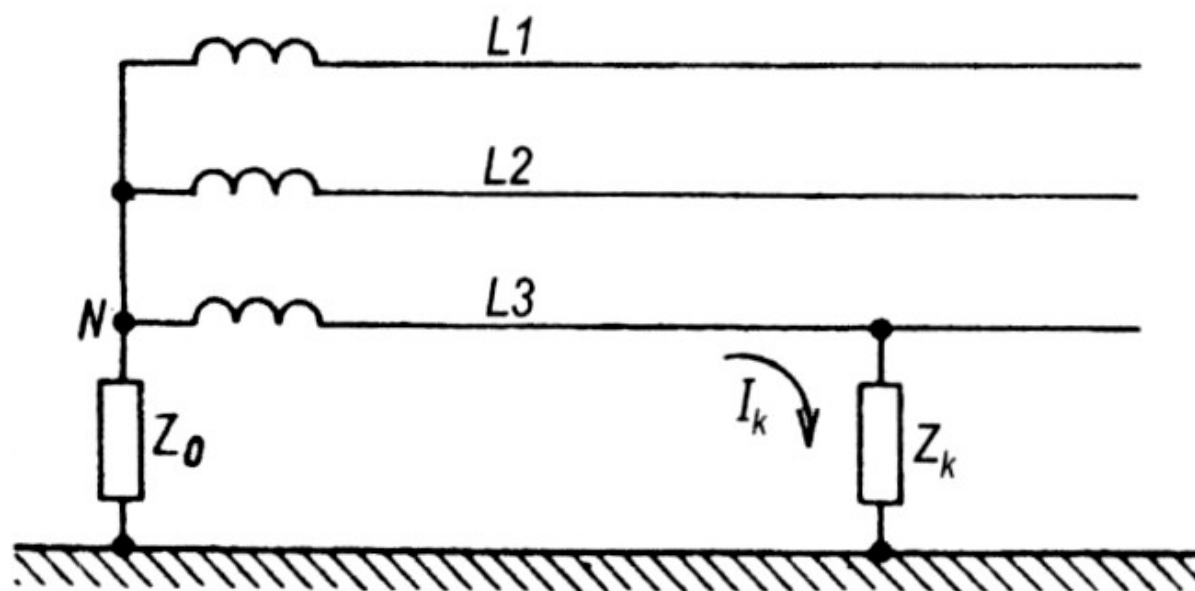
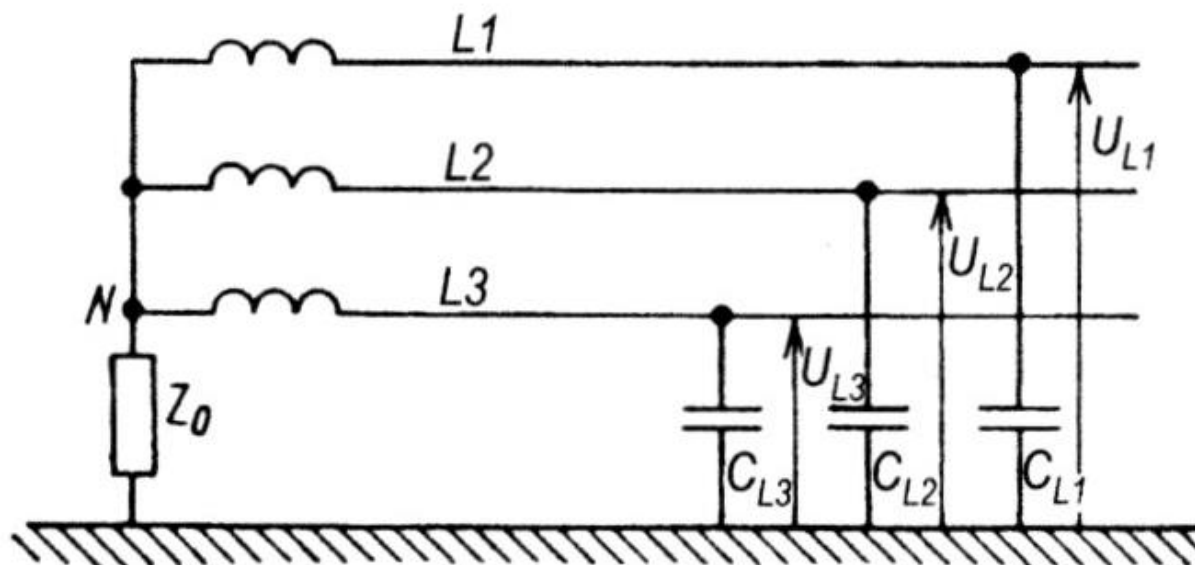
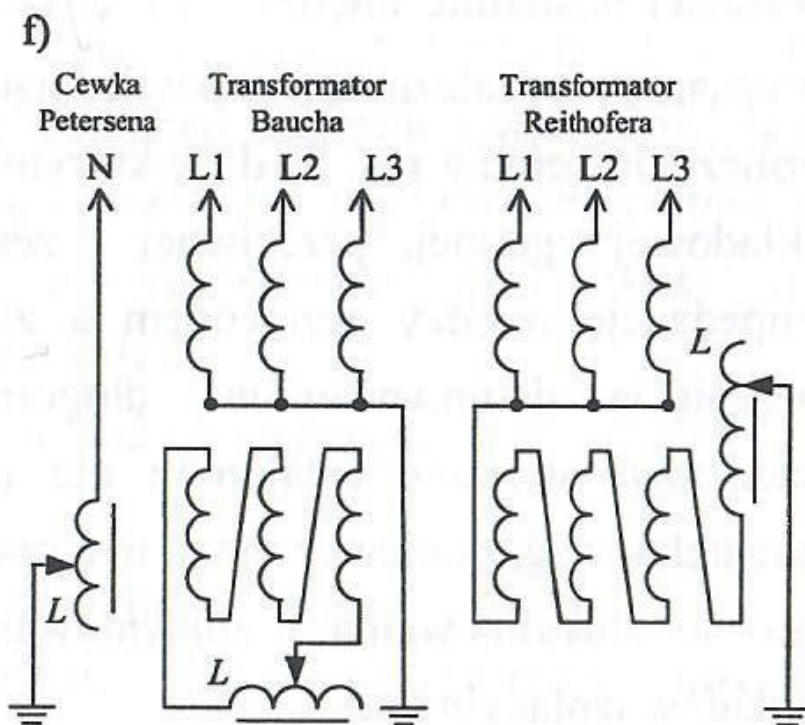
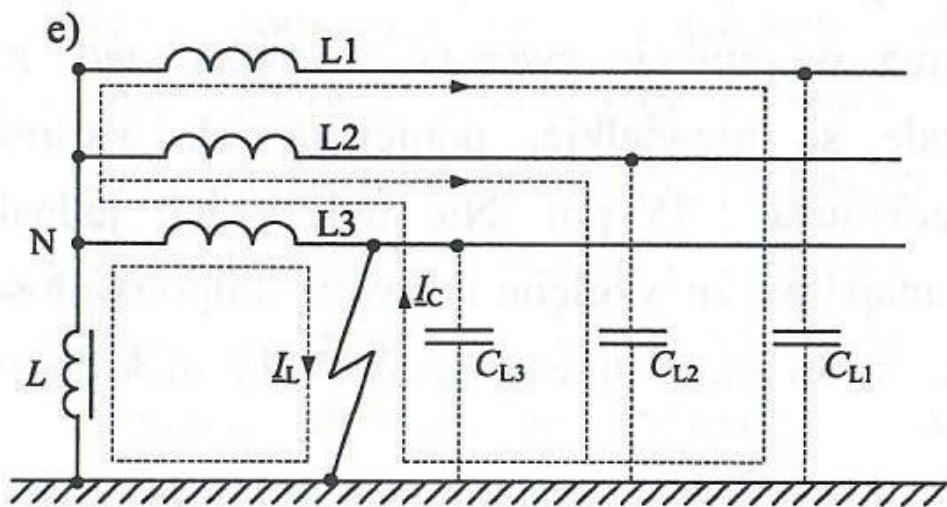
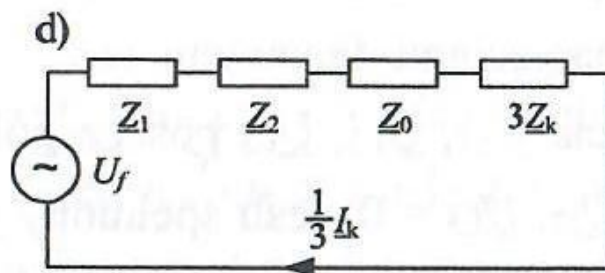
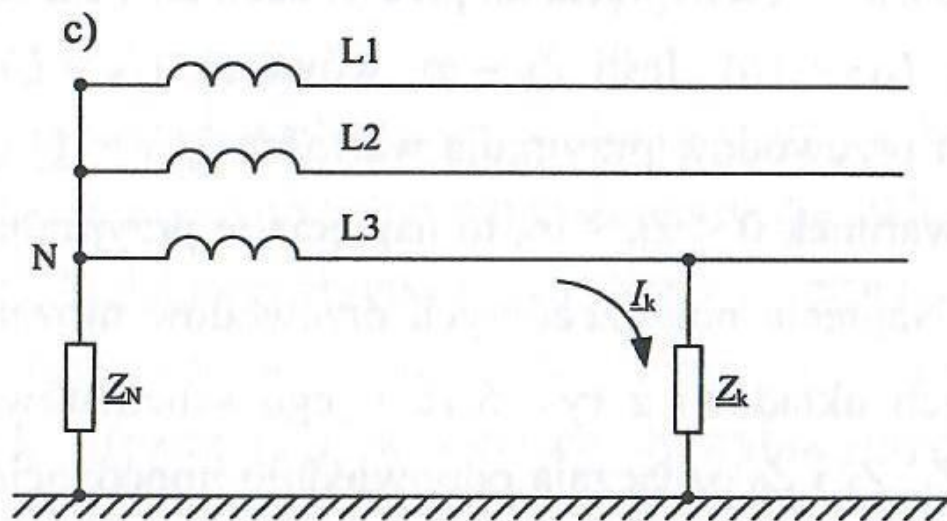
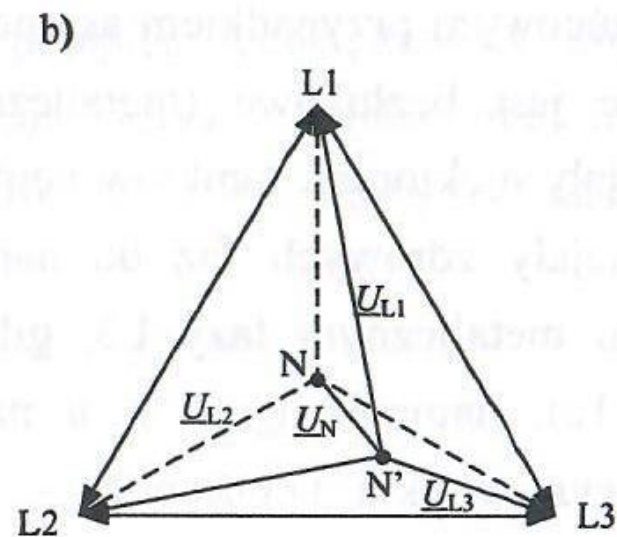
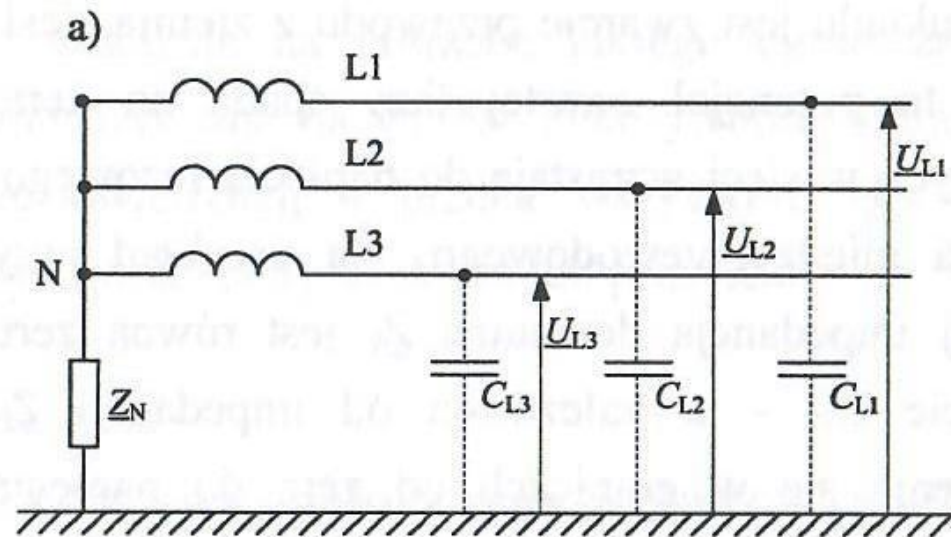
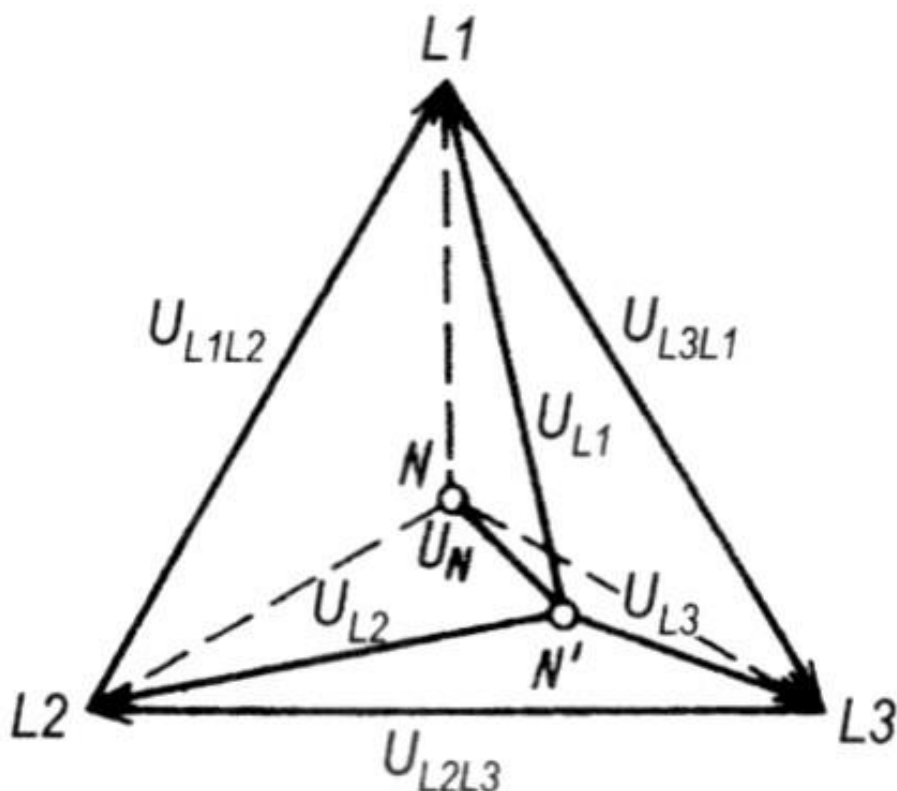


Przebiegi wewnętrzne dorywcze ziemnozwarciowe



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.

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

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

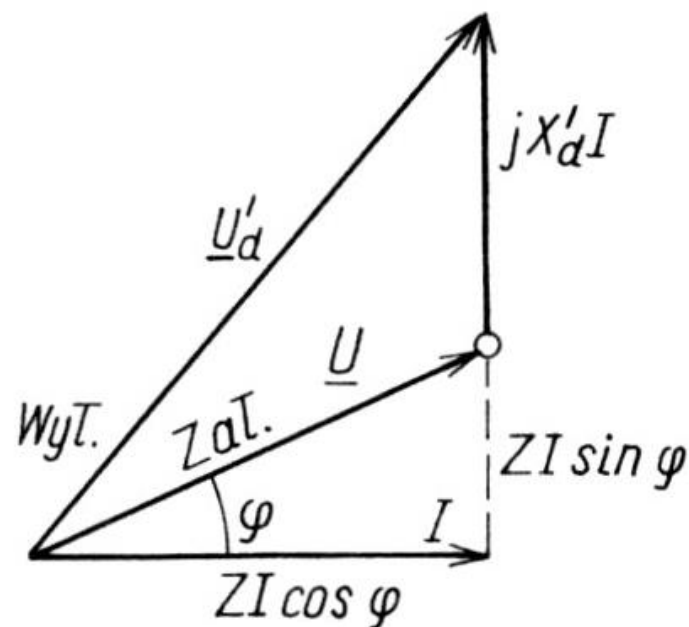
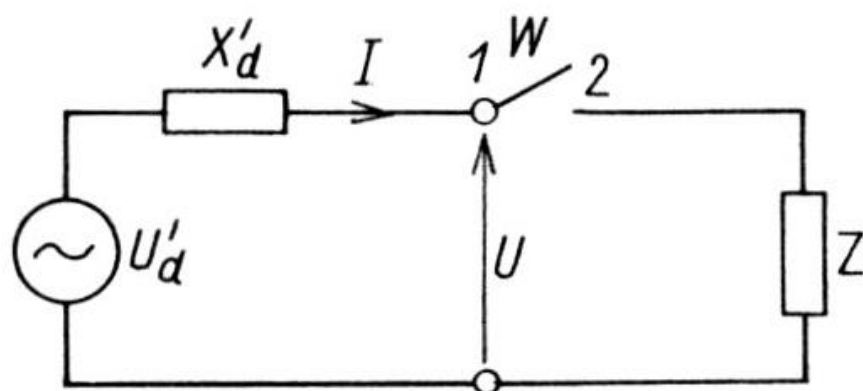
$$X_0 \leq X_1 \text{ i } R_0 \leq 0,5X_1 \quad \rightarrow \quad k_e \leq 1,1 \text{ i } k_u \leq 0,65$$

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:

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

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

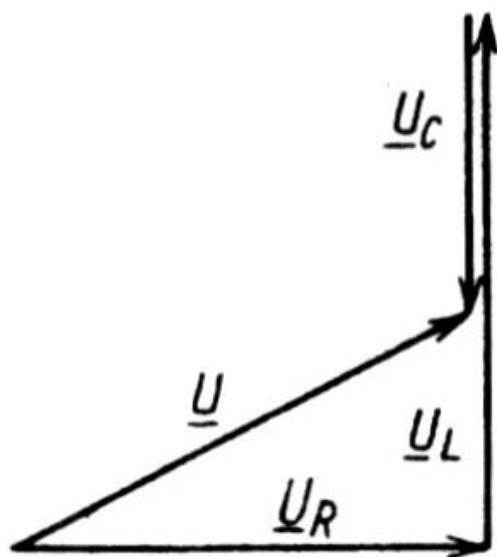
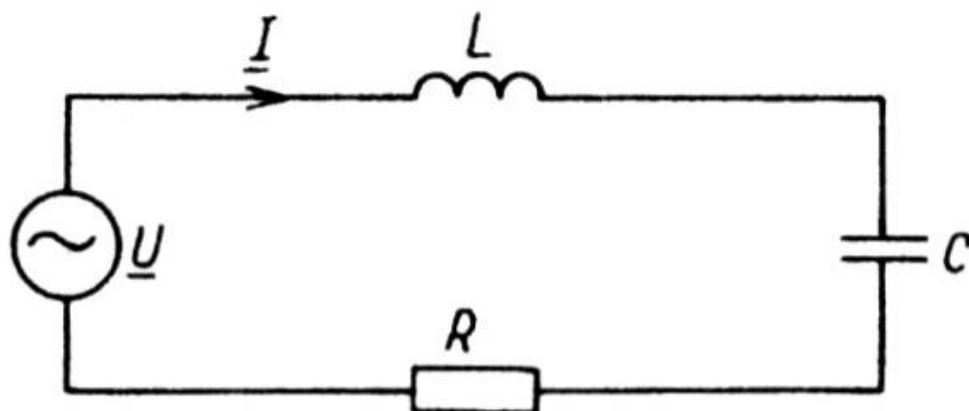
$$v = 300 \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$$

otrzymujemy:

$$k_d = 1,24$$

Przebiegi wewnętrzne dorywcze rezonansowe

Przebiegi przy rezonansie szeregowym w obwodzie liniowym



Ilustracja przebieg rezonansowych;
układ i wykres wskazowy

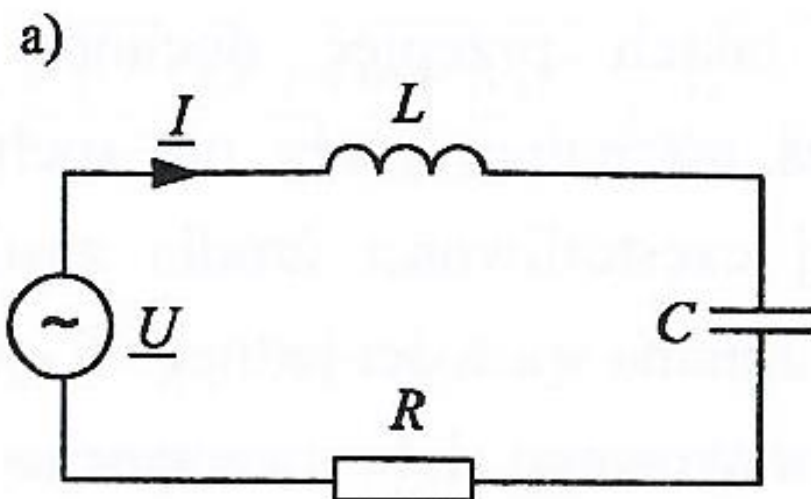
warunek rezonansu:

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

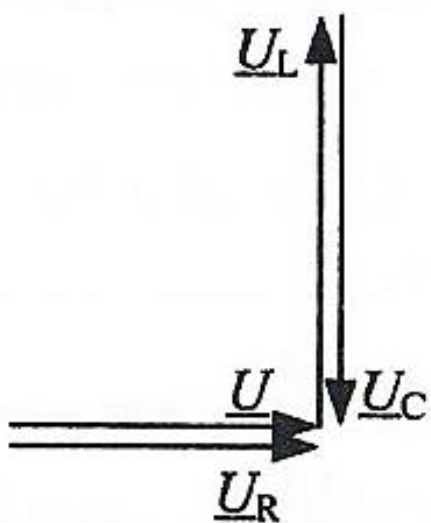
współczynnik przebieg:

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

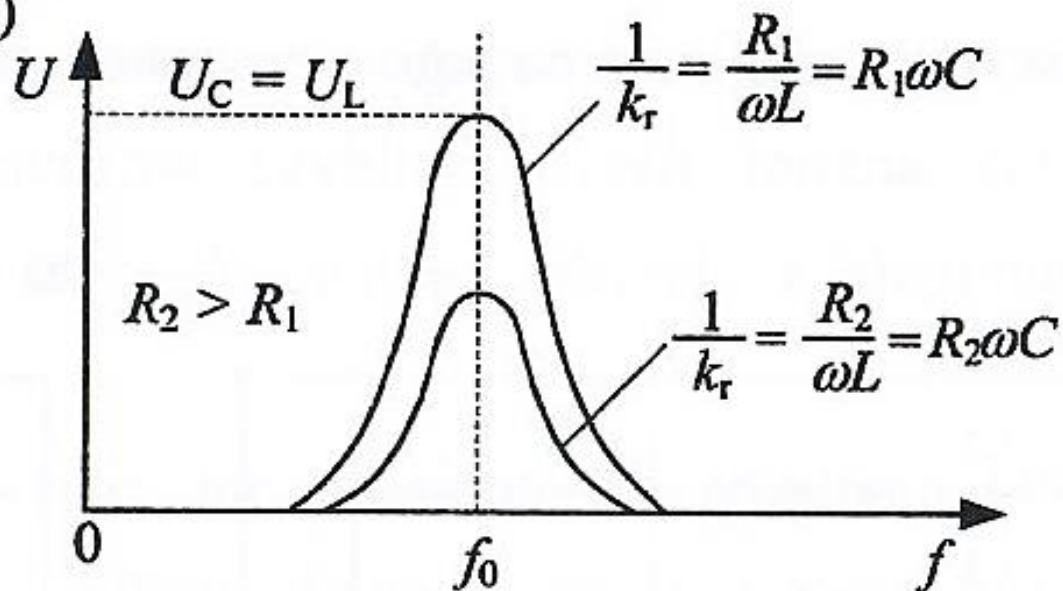
k_r może dochodzić do 3



b)



c)

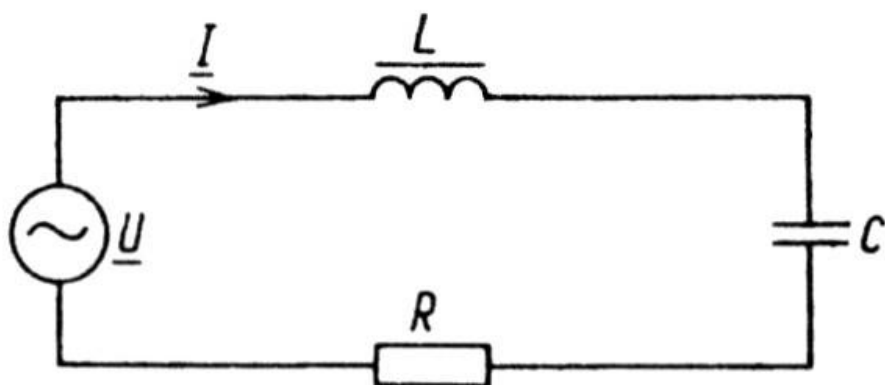


Ilustracja idealnego rezonansu napięć:

a) układ elektryczny,

b) wykres wskazowy,

c) charakterystyka częstotliwościowa napięcia.

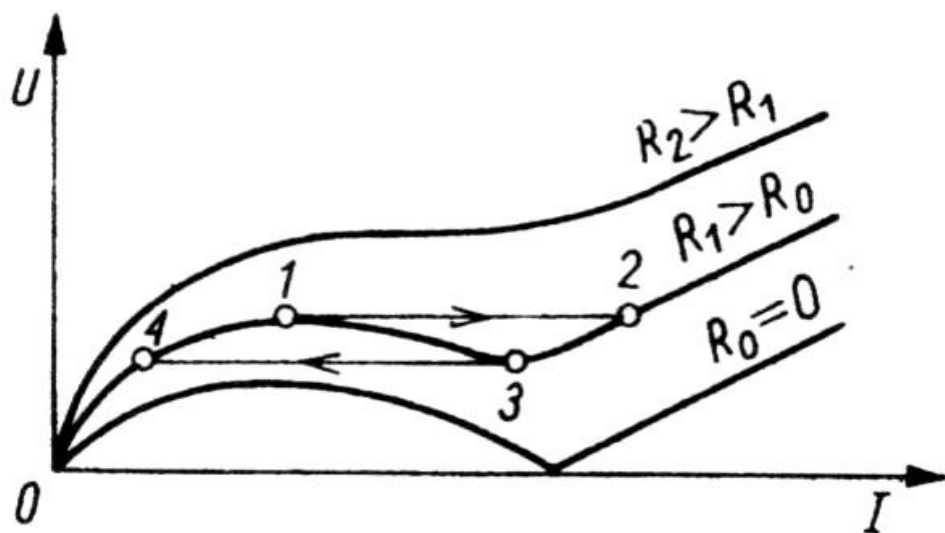
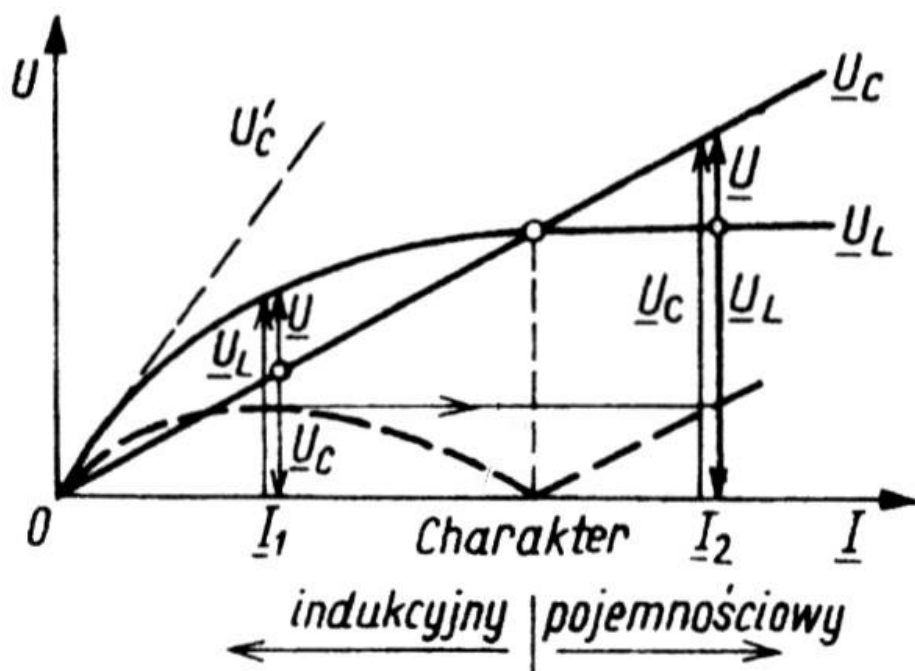


Przebiegi ferrerezonansowe

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

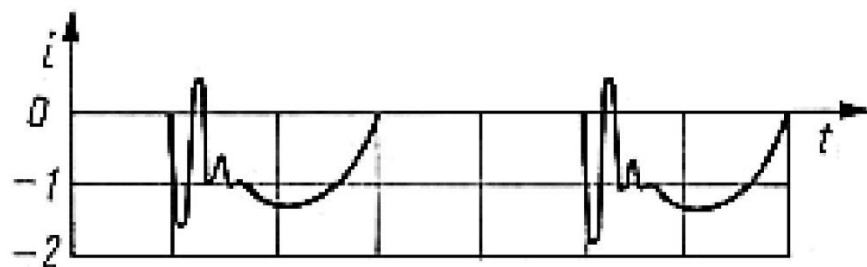
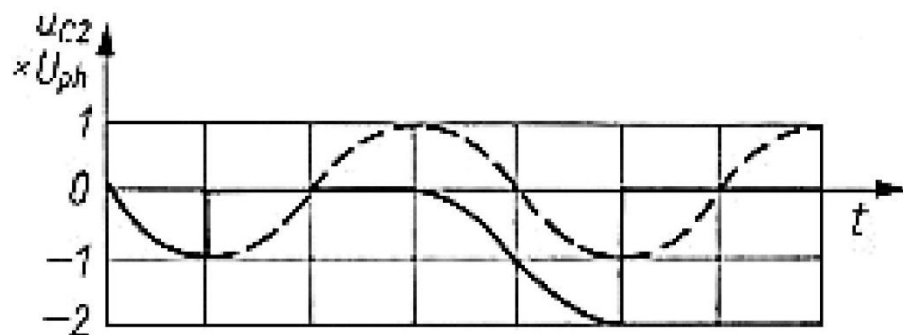
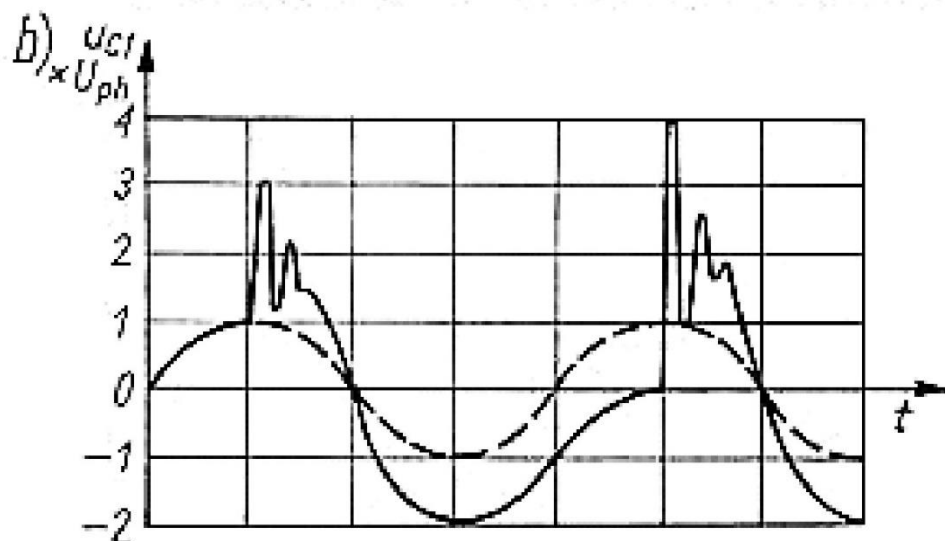
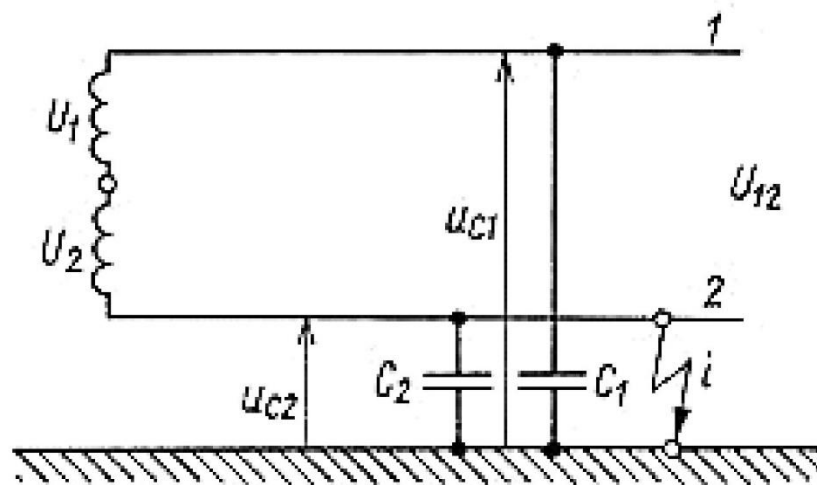
Przebiegi wewnętrzne łączeniowe awaryjne

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.

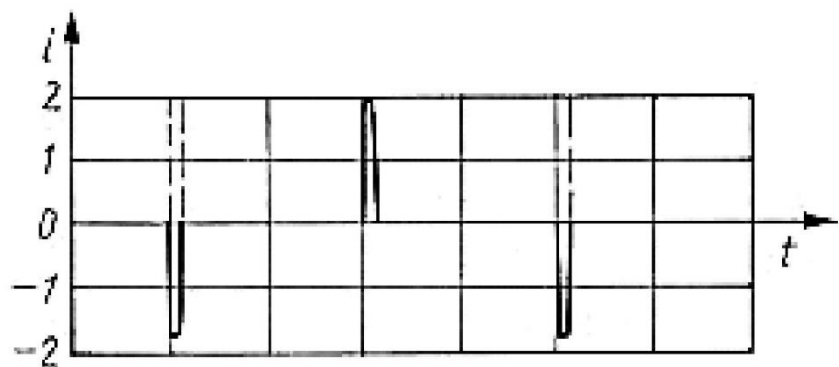
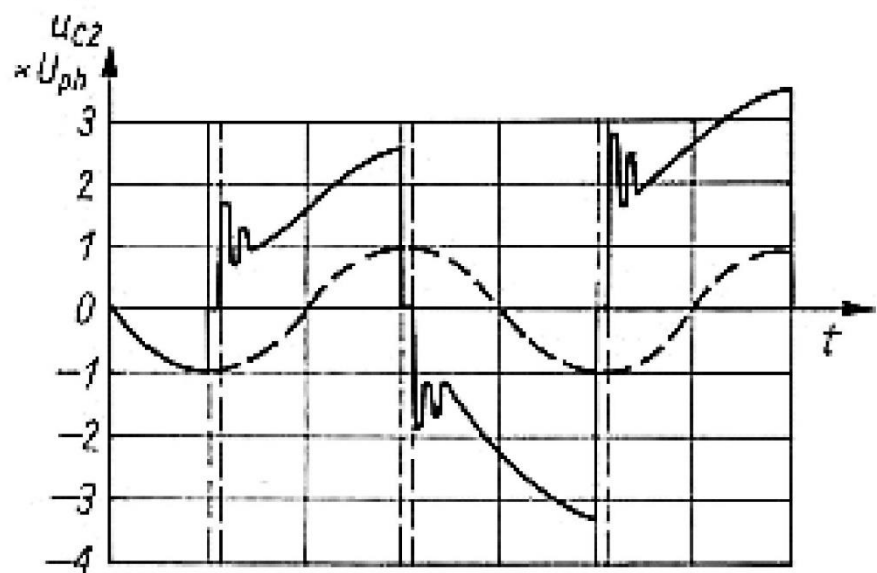
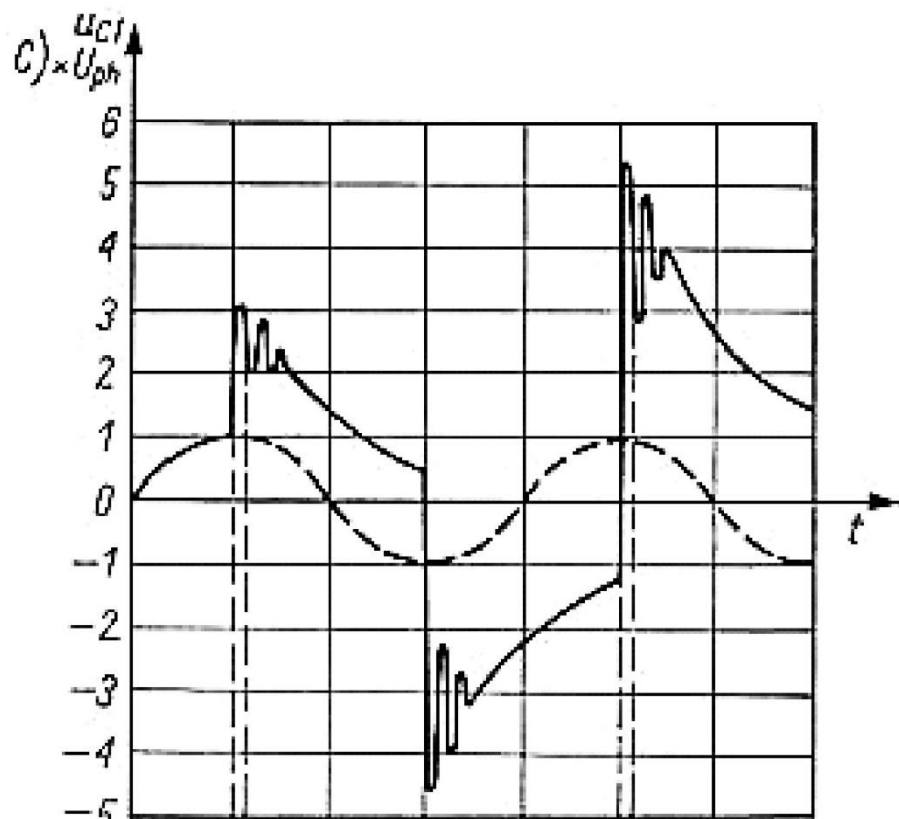
a)



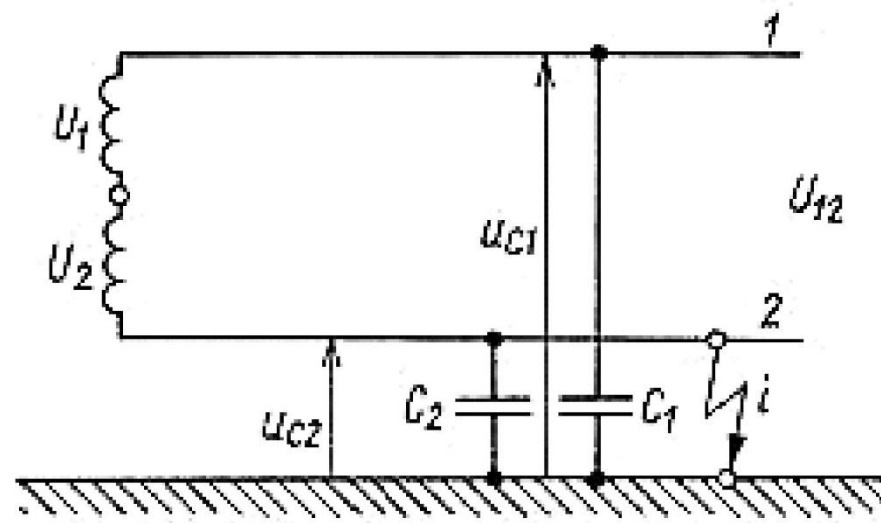
Przykład powstawania i rozwoju przebiegów zgodnie z mechanizmem Petersa:

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

Przyczyny

Wraz ze wzrostem napięć przesyłowych (400 kV i więcej), przebiegi generowane wewnątrz systemu osiągnęły ten sam rząd wielkości co przebiegi piorunowe lub wyższe.

Przebiegi te trwają dłużej i dlatego są niebezpieczne dla systemu, zależą od znamionowego napięcia systemu i dlatego zwiększają się wraz ze jego wzrostem.

W zakresie najwyższych napięć (> 245 kV) udary łączeniowe decydują o poziomie izolacji linii i innych urządzeń, to znaczy decydują o ich wymiarach i kosztach.

Załączanie i przerywanie obwodów elektrycznych może powodować przebiegi w systemach elektroenergetycznych o dużych indukcyjnościach i pojemnościach.

Charakterystyka przebiegów łączeniowych

Kształty fal przebiegów łączeniowych mogą być skutkiem następujących zdarzeń:

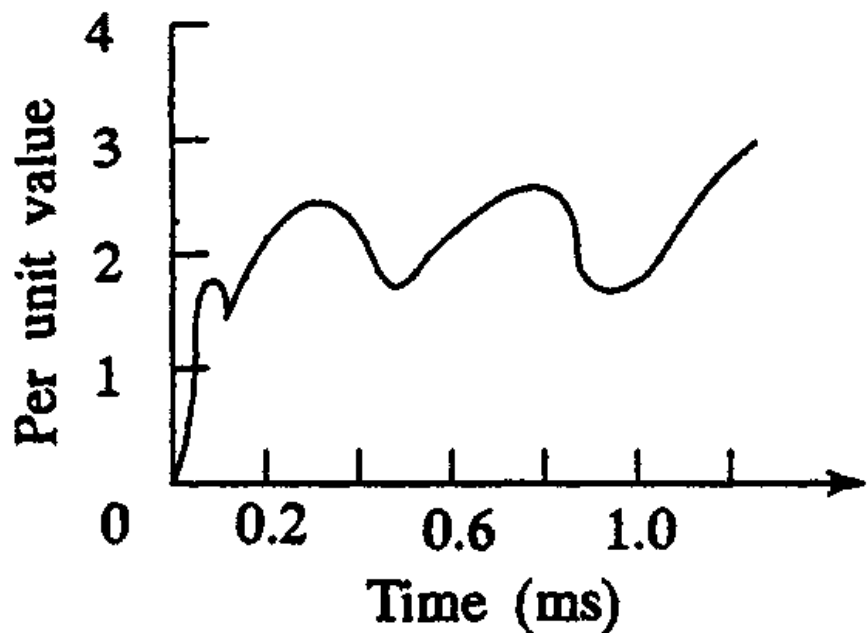
- 1) Odłączenie zasilania linii przesyłowych, kabli, kondensatorów bocznikowych itp.
- 2) Odłączenie nieobciążonych transformatorów, dławików itp.
- 3) Załączanie linii i odbiorników biernych.
- 4) Nagłe wyłączenie obciążeń.
- 5) Powstawanie zwarć i ich usuwanie.

Przebiegi łączeniowe mają charakter nieregularny (oscylacyjny lub jednobiegunowy) i mogą mieć wysoką częstotliwość lub częstotliwość sieciową wraz z jej harmonicznymi.

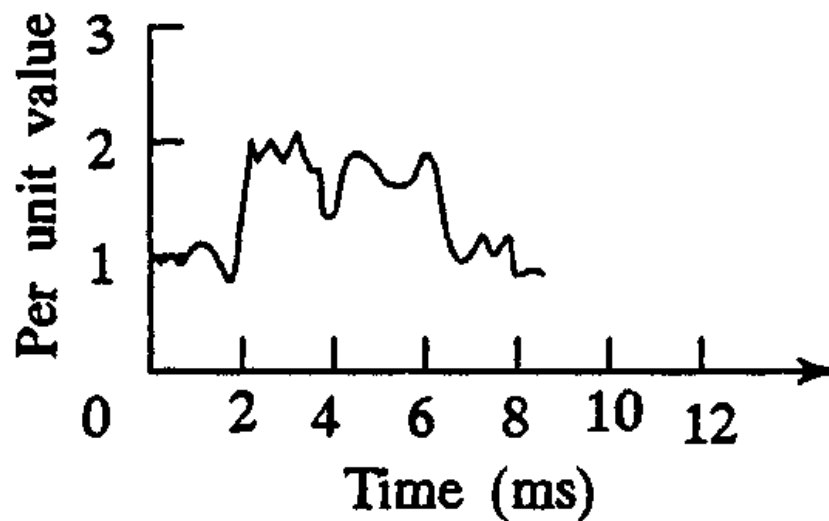
Przebiegi powstają, gdy następuje nagłe uwolnienie energii zmagazynowanej w postaci elektrostatycznej (w pojemności), albo w postaci elektromagnetycznej (w indukcyjności).

Typowe zarejestrowane przebiegi przebiegów łączeniowych przedstawiono na następnej stronie.

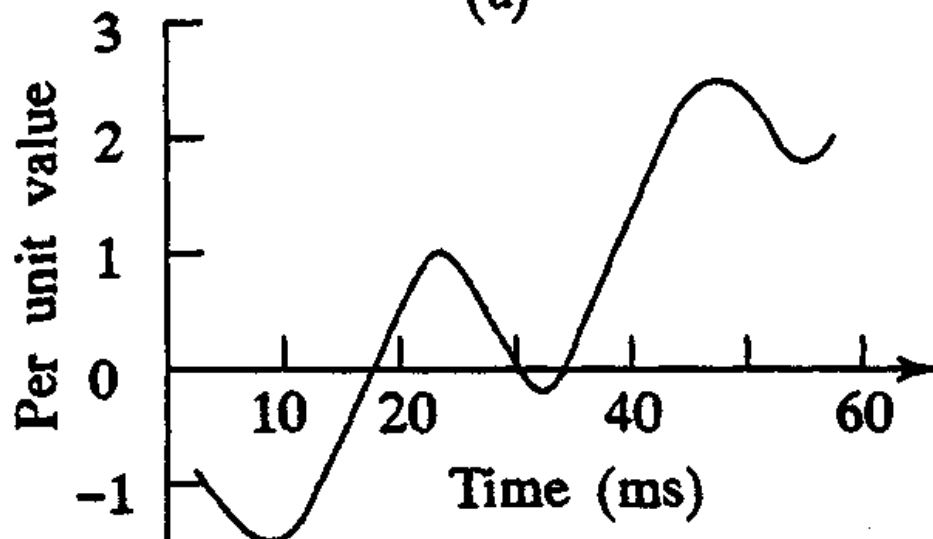
- (a) Napięcie powrotne po wyłączeniu zwarcia.
- (b) Przebiegi w chwili powstania zwarcia.
- (c) Przebiegi na końcu linii po wyłączeniu zwarcia.
- (d) Załączenie pod napięcie długiej linii przesyłowej.
- (e) Przebiegi na końcu linii podczas po jej załączeniu.



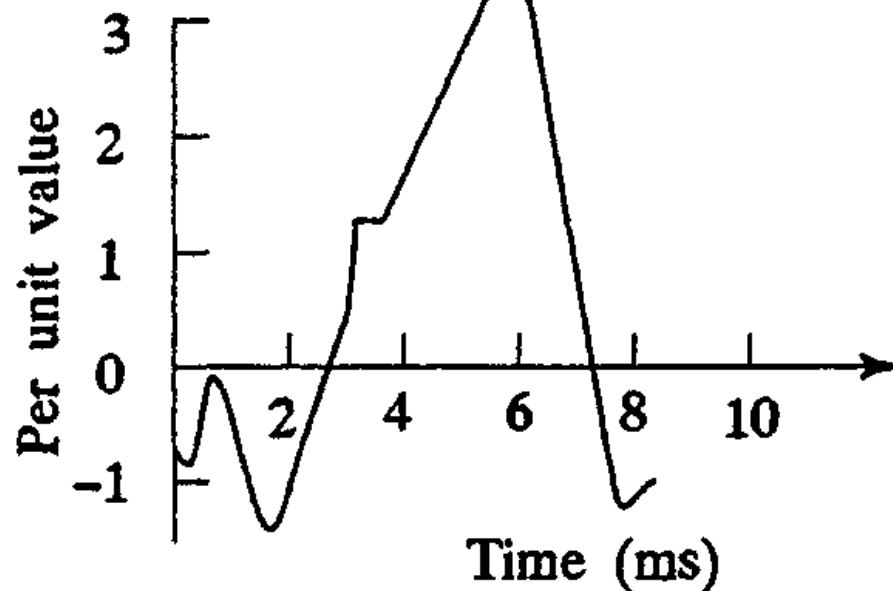
(a)



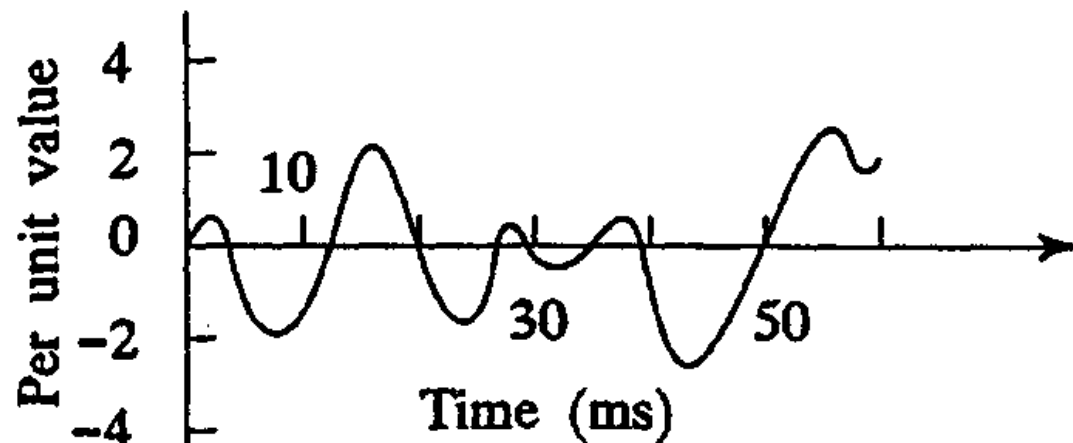
(b)



(c)



(d)



(e)

Badania eksperymentalne przebiegów łączeniowych

Badania terenowe w celu określenia oczekiwanej maksymalnej amplitudy przebiegów i czasu ich trwania w różnych punktach linii.

Głównymi czynnikami badanymi są:

- 1) wpływ parametrów linii, kondensatorów szeregowych i dławików bocznikowych na przebieg stanów nieustalonych,
- 2) współczynniki tłumienia potrzebne do ograniczenia przebiegów,
- 3) wpływ załączenia i ponownego załączenia za pomocą rezystorów szeregowych lub wyłączników automatycznych na przebieg,
- 4) charakterystyka ogranicznika przebiegów.

Ograniczanie przebiegów łączeniowych

W sieciach najwyższych napięć konieczne jest ograniczanie przebiegów łączeniowych do bezpiecznej wartości mniejszej niż 2,5 p.u. albo nawet do 2,0 p.u. lub niższej.

Środki podejmowane w celu ograniczenia przebiegów to:

- 1) jednostopniowe lub wielostopniowe zasilenie linii przez wstępne włączanie rezystorów,

- 2) sterowane fazowo załączanie wyłączników z wykorzystaniem odpowiednich czujników,
- 3) odprowadzanie ładunków uwięzionych na długich liniach przed ponownym zamknięciem linii,
- 4) ograniczenie przepięć poprzez zastosowanie ograniczników przepięć.

Pierwsze trzy metody, jeśli zostaną właściwie zastosowane, ograniczą przepięcia łączeniowe do 2,0 lub 1,5 p.u.

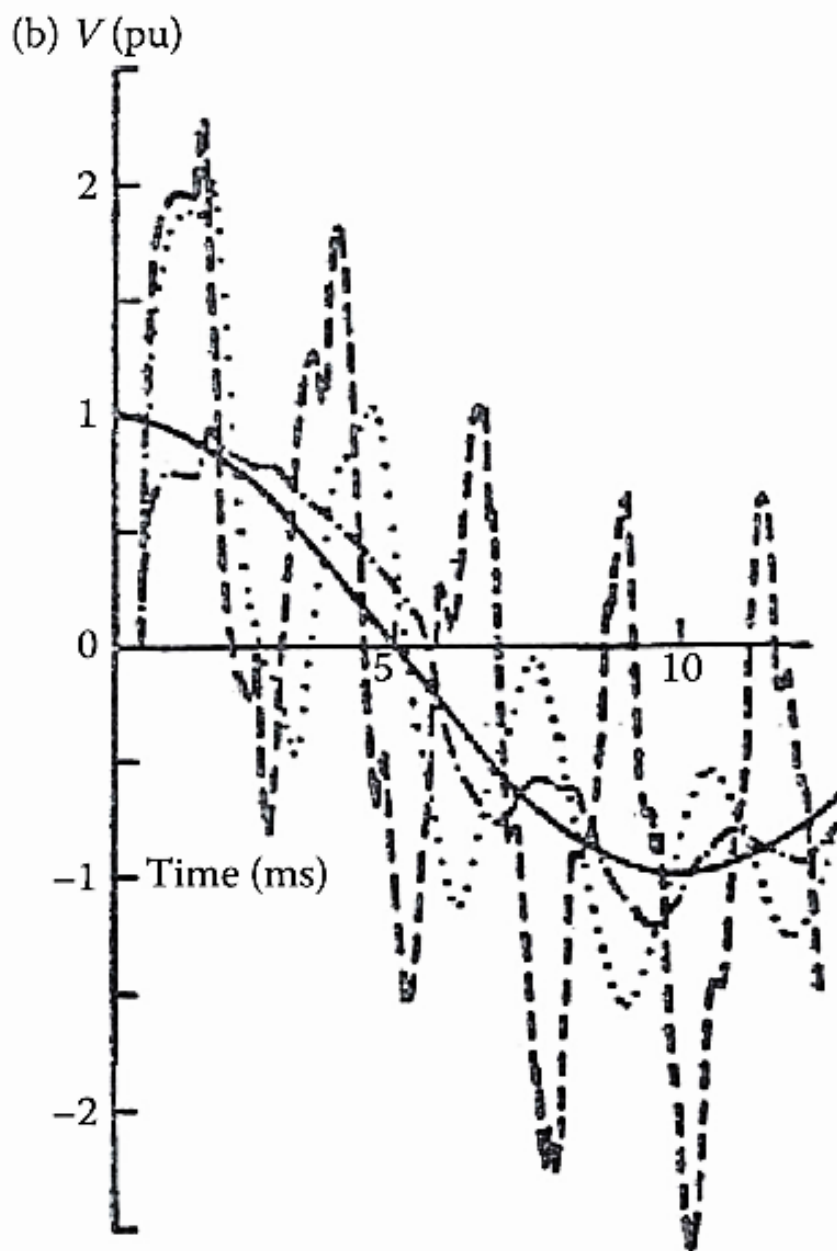
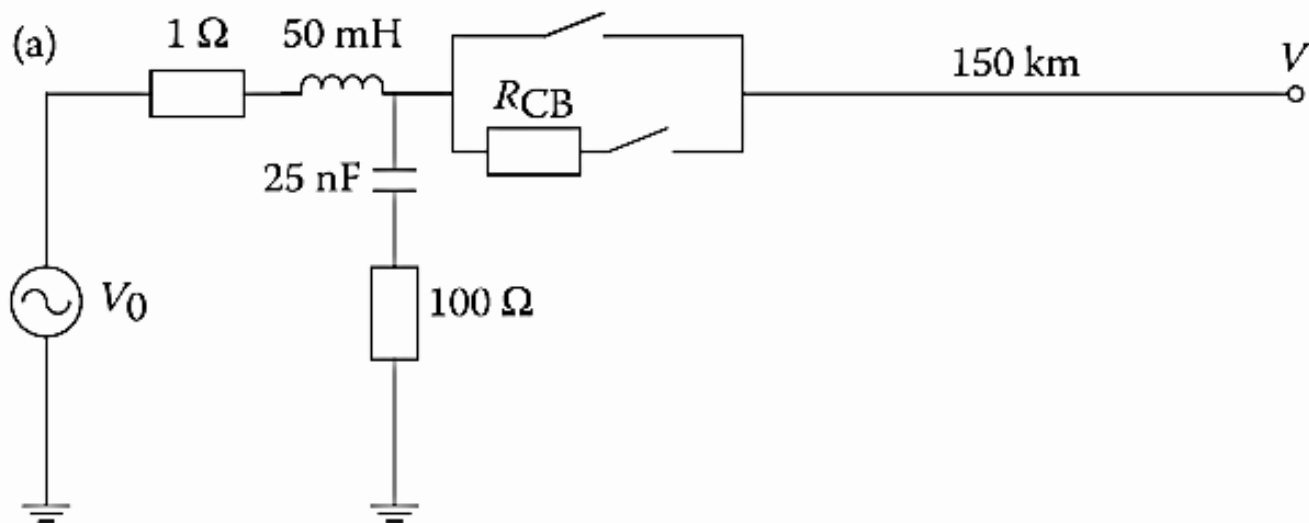
Badanie komputerowe przepięć łączeniowych

Przykładowe wyniki badania przedstawiono na następnej stronie.

Linia przerywana prezentuje symulowane wartości przepięcia uzyskane bez uwzględnienia częstotliwościowej zależności parametrów impedancyjnych modelu.

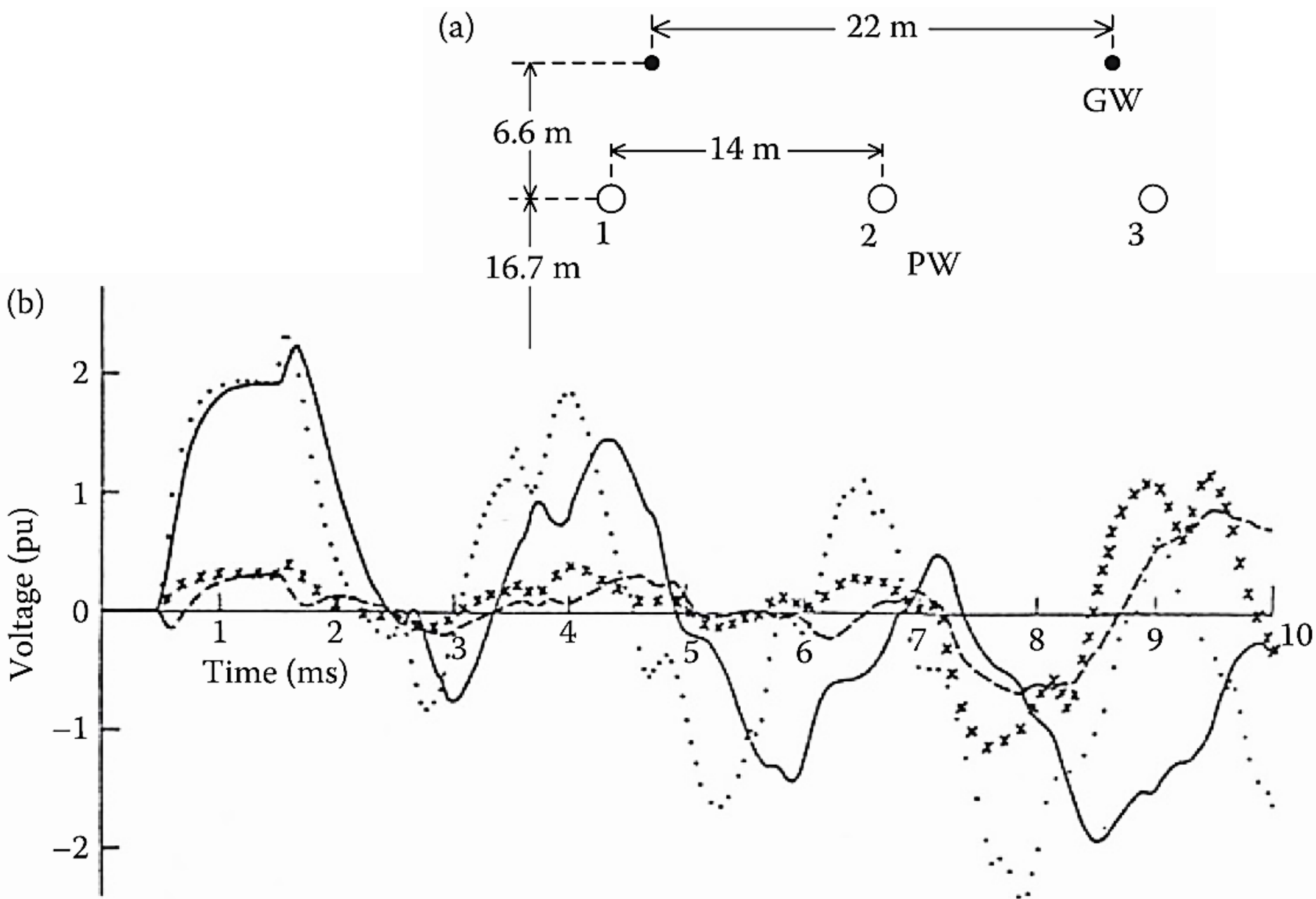
Linia kropkowa to przebieg tego przepięcia z uwzględnieniem częstotliwościowo zależnych parametrów modelu. Widoczne silne tłumienie przepięcia.

Przebieg kropkowo-kreskowy uzyskano załączając napięcie na linię przez opornik zamykający R_{CB} , skutecznie ograniczający amplitudę przepięcia.



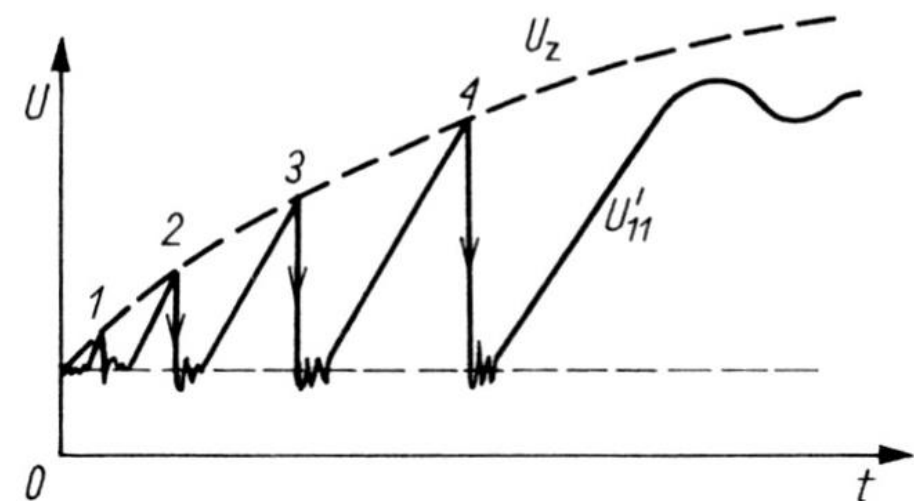
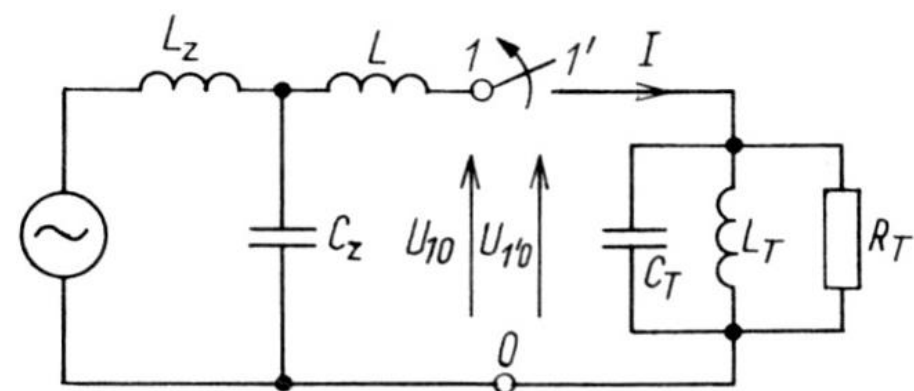
Przebieg przy
włączaniu zasilania
jednej fazy linii:

- (a) schemat modelu
komputerowego
badanego układu,
(b) wyniki symulacji.



Przebiegi przepięć na końcu linii przy załączaniu kolejnych faz pod napięcie; (a) konfiguracja linii o długości 150 km, (b) symulowane przebiegi przy załączaniu faz: faza 1 (90°), faza 2 (150°), faza 3 (180°). Wyniki przy parametrach niezależnych od częstotliwości: — faza 1, - · - · - faza 3. Wyniki przy parametrach zależnych od częstotliwości: faza 1, ×××× faza 3.

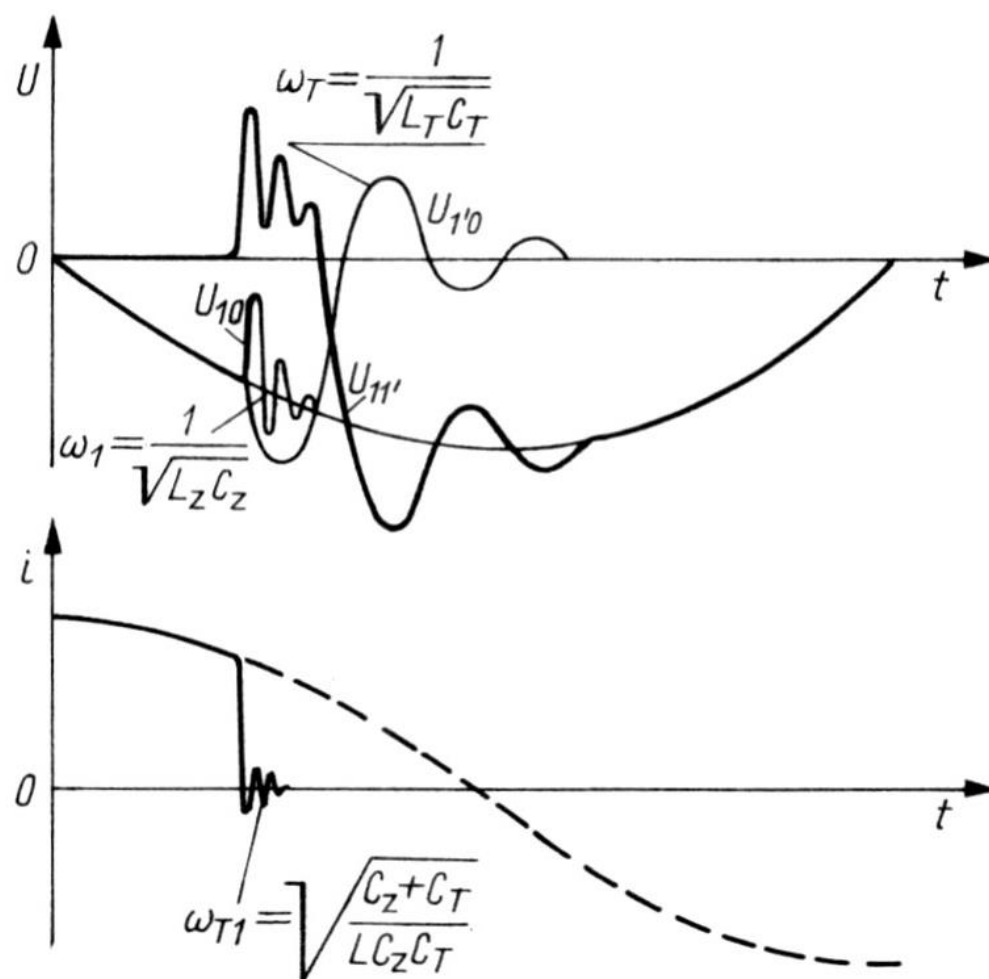
Przebiegi przy wyłączaniu małych prądów indukcyjnych



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

ψ - 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:

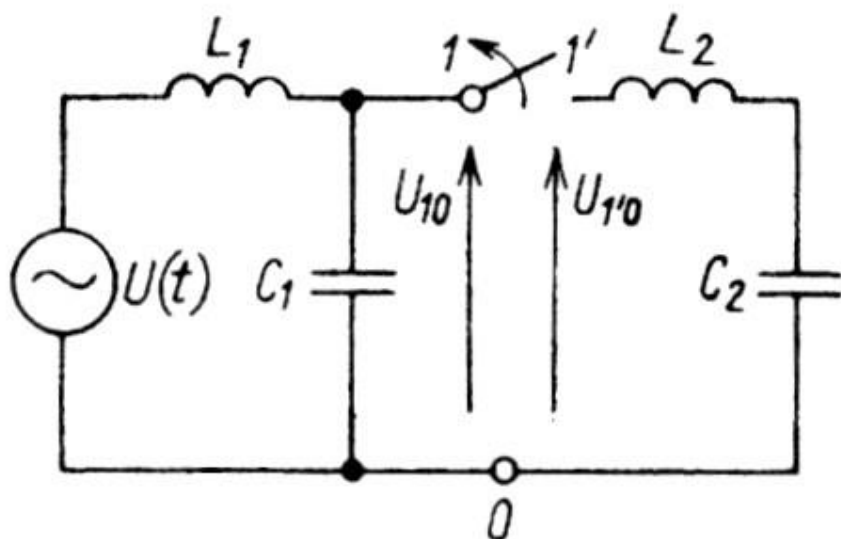
$$U_{11'}(t) = U_m \cos(\omega t + \psi) + \\ - \left(U_m \cos \psi \cos \omega_T t - I_m \sin \psi \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} \sin \omega_T t \right) e^{-\alpha \omega_T t}$$

gdzie:

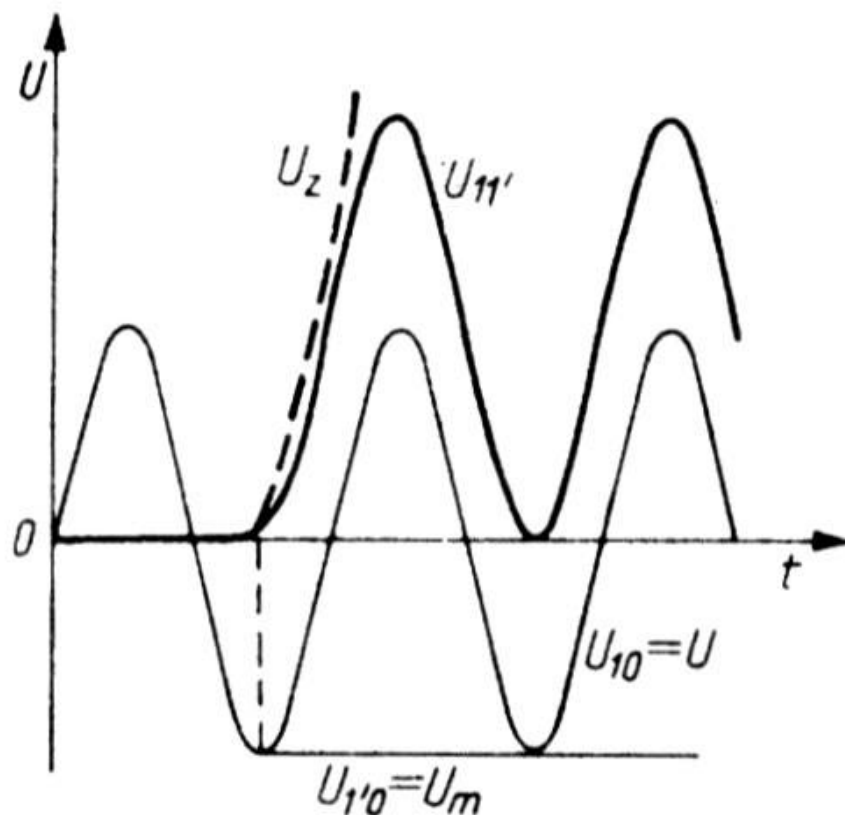
$$\alpha = \frac{\omega_T L_T}{2R_T}; \quad \omega_T = \frac{1}{\sqrt{L_T C_T}};$$

ω - pulsacja podstawowa ($f = 50$ Hz).

Przebiegi napięć przy wyłączaniu prądów pojemnościowych



Obwód z odłączaną pojemnością zastępczą C_2 od źródła dużej mocy



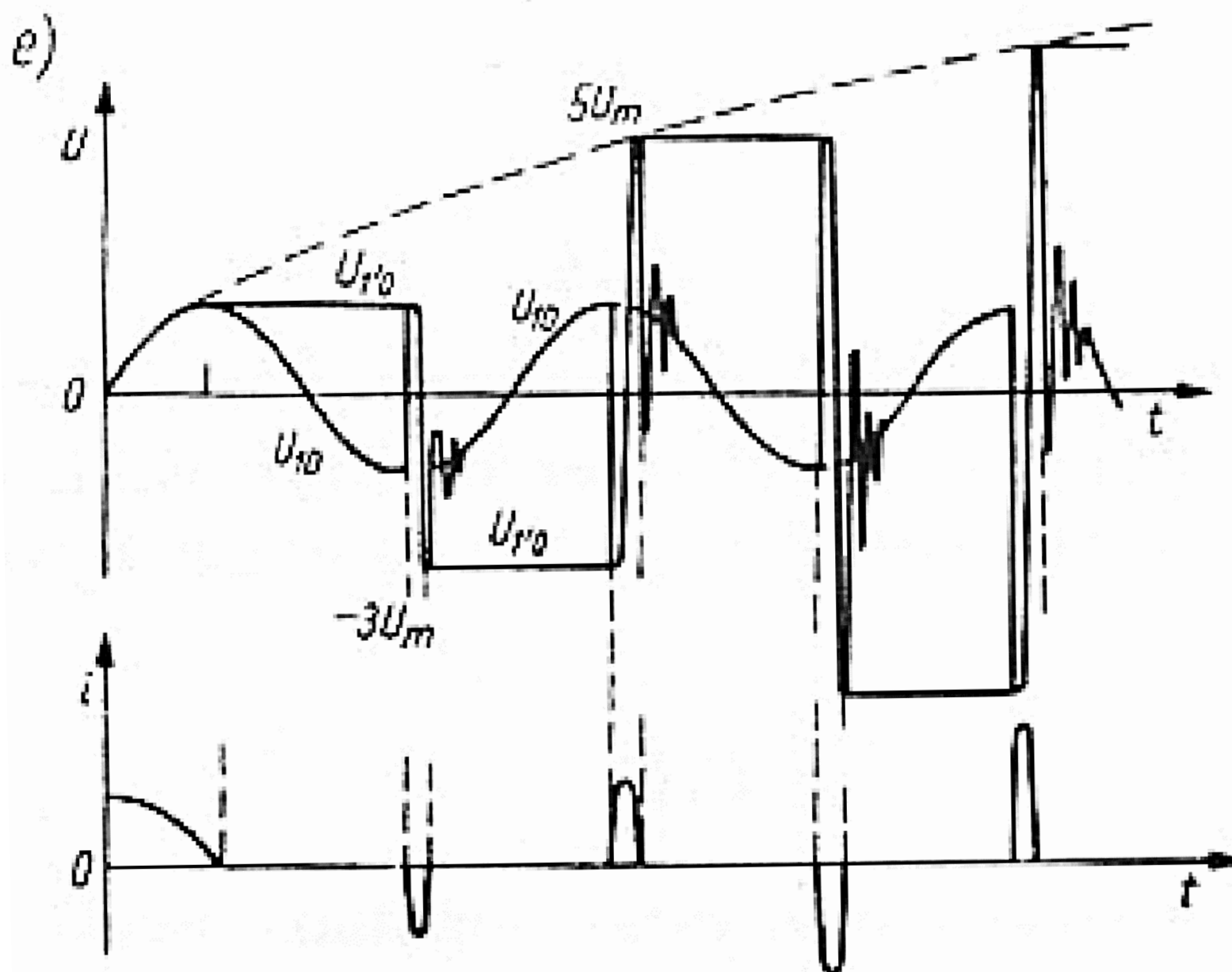
Przebiegi napięcia:

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

Przykłady obliczeniowe

Przykład 1.

Jednotorowa linia trójfazowa o napięciu znamionowym

$U_n = 220$ kV i długości $l = 400$ km, o parametrach:

$$L = 1,26 \text{ mH/km}$$

$$C = 0,009 \text{ } \mu\text{F/km}$$

Pominięto parametry stratne linii.

Obliczyć:

- impedancję falową linii Z ,
- prędkość propagacji v ,
- czas propagacji τ .

Obliczenia:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1,26 \cdot 10^{-3}}{9 \cdot 10^{-9}}} = 374,14 \text{ } \Omega$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{1,26 \cdot 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{-9}}} = 2,97 \cdot 10^5 \frac{\text{km}}{\text{s}}$$

$$\tau = \frac{l}{v} = \frac{400}{2,97 \cdot 10^5} = 1,347 \text{ ms}$$

Przykład 2.

Linia napowietrzna o impedancji falowej $Z_n = 400 \Omega$ jest połączona z linią kablową o impedancji falowej $Z_k = 60 \Omega$. Zasilana falą prostokątną o wartości $u'_1 = 300 \text{ kV}$ przechodzi raz z linii napowietrznej do kablowej, a raz z linii kablowej do napowietrznej. Dla każdego przypadku obliczyć wartość napięcia fali odbitej w miejscu połączenia tych linii oraz fali przechodzącej do drugiej linii.

Obliczenia:

Przejście przepięcia z linii napowietrznej do kablowej:

Fala odbita:

$$u''_1 = u'_1 \cdot \alpha_{ou(l-k)} = u'_1 \cdot \frac{Z_k - Z_l}{Z_k + Z_l} = 300 \cdot \frac{60 - 400}{60 + 400} = 300 \cdot (-0,74) = -222 \text{ kV}$$

Fala przechodząca do linii kablowej:

$$u'_k = u'_1 \cdot \alpha_{pu(l-k)} = u'_1 \cdot \frac{2 \cdot Z_k}{Z_k + Z_l} = 300 \cdot \frac{2 \cdot 60}{60 + 400} = 300 \cdot 0,26 = 78 \text{ kV}$$

$$u_l = u'_k = u'_1 + u''_1 = 300 + (-222) = 78 \text{ kV}$$

Przejście przepięcia z linii kablowej do napowietrznej:

Fala odbita:

$$u''_k = u'_k \cdot \alpha_{ou(k-l)} = u'_l \cdot \frac{Z_l - Z_k}{Z_l + Z_k} = 300 \cdot \frac{400 - 60}{400 + 60} = 300 \cdot 0,74 = 222 \text{ kV}$$

Fala przechodząca do linii napowietrznej:

$$u'_l = u'_k \cdot \alpha_{pu(k-l)} = u'_k \cdot \frac{2 \cdot Z_l}{Z_l + Z_k} = 300 \cdot \frac{2 \cdot 400}{400 + 60} = 300 \cdot 1,74 = 522 \text{ kV}$$

$$u_k = u'_l = u'_k + u''_k = 300 + 222 = 522 \text{ kV}$$

Przykład 3.

Linia kablowa o indukcyjności $L_k = 0,189$ mH/km i pojemności $C_k = 0,3$ μ F/km jest połączona z linią napowietrzną o indukcyjności $L_l = 1,26$ mH/km i pojemności $C_l = 0,009$ μ F/km. Obliczyć płynące i odbite fale napięcia i prądu na złączu, jeśli udar 200 kV przepływa do złącza, raz wzdłuż kabla, a raz wzdłuż linii napowietrznej.

Obliczenia:

$$Z_k = \sqrt{\frac{L_k}{C_k}} = \sqrt{\frac{0,189 \cdot 10^{-3}}{0,3 \cdot 10^{-6}}} = 25,1 \Omega$$

$$Z_l = \sqrt{\frac{L_l}{C_l}} = \sqrt{\frac{1,26 \cdot 10^{-3}}{0,009 \cdot 10^{-6}}} = 374,2 \Omega$$

Przejście udaru z linii kablowej do napowietrznej:

Współczynniki odbicia:

$$\alpha_{ou(k-l)} = \frac{Z_l - Z_k}{Z_l + Z_k} = \frac{374,2 - 25,1}{374,2 + 25,1} = 0,8742 \quad \alpha_{oi(k-l)} = -0,8742$$

Współczynniki przejścia:

$$\alpha_{pu(k-l)} = \frac{2 \cdot Z_l}{Z_l + Z_k} = \frac{2 \cdot 374,2}{374,2 + 25,1} = 1,8742$$

$$\alpha_{pi(k-l)} = \frac{2 \cdot Z_k}{Z_l + Z_k} = \frac{2 \cdot 25,1}{374,2 + 25,1} = 0,1257$$

Fale odbite:

$$u_k'' = u_k' \cdot \alpha_{ou(k-l)} = 200 \cdot 0,8742 = 174,84 \text{ kV}$$

$$i_k' = \frac{u_k'}{Z_k} = \frac{200}{25,1} = 7,968 \text{ kA}$$

$$i_k'' = i_k' \cdot \alpha_{oi(k-l)} = 7,968 \cdot (-0,8742) = -6,966 \text{ kA}$$

Fale przechodzące do linii napowietrznej:

$$u_l' = u_k = u_k' \cdot \alpha_{pu(k-l)} = 200 \cdot 1,8742 = 374,84 \text{ kV}$$

$$i_l' = i_k = i_k' \cdot \alpha_{pi(k-l)} = 7,968 \cdot 0,1257 = 1,002 \text{ kA}$$

Przejście udaru z linii napowietrznej do kablowej:

Współczynnik odbicia:

$$\alpha_{ou(l-k)} = \frac{Z_k - Z_l}{Z_k + Z_l} = \frac{25,1 - 374,2}{25,1 + 374,2} = -0,8742 \quad \alpha_{oi(l-k)} = 0,8742$$

Fala przechodząca do linii napowietrznej:

$$\alpha_{pu(l-k)} = \frac{2 \cdot Z_k}{Z_k + Z_l} = \frac{2 \cdot 25,1}{25,1 + 374,2} = 0,1257 \quad \alpha_{pi(l-k)} = 1,8742$$

Fale odbite:

$$u_l'' = u_l' \cdot \alpha_{ou(l-k)} = 200 \cdot (-0,8742) = -174,84 \text{ kV}$$

$$i_l' = \frac{u_l'}{Z_l} = \frac{200}{374,2} = 0,5345 \text{ kA}$$

$$i_l'' = i_l' \cdot \alpha_{oi(l-k)} = 0,5345 \cdot 0,8742 = 0,4673 \text{ kA}$$

Fale przechodzące do linii kablowej:

$$u_k' = u_l = u_l' \cdot \alpha_{pu(l-k)} = 200 \cdot 0,1257 = 25,14 \text{ kV}$$

$$i_k' = i_l = i_l' \cdot \alpha_{pi(l-k)} = 0,5345 \cdot 1,8742 = 1,002 \text{ kA}$$

Przykład 4.

Linia napowietrzna o impedancji falowej $Z_a = 500 \Omega$ jest połączona kablem o impedancji falowej $Z_k = 50 \Omega$ z inną linią napowietrzną o impedancji falowej $Z_b = 600 \Omega$. Krótka fala o napięciu 100 kV przemieszcza się z linii 500Ω w kierunku linii 600Ω przez kabel. Obliczyć napięcie na złączu linii 500Ω i kabla po pierwszym i drugim odbiciu.

Obliczenia:

Fala po odbiciu od kabla (pierwsze odbicie):

$$\underline{u}'_k = u_a = \underline{u}'_a + \underline{u}''_a = \underline{u}'_a \cdot \frac{2 \cdot Z_k}{Z_k + Z_a} = 100 \cdot \frac{2 \cdot 50}{50 + 500} = 18,18 \text{ kV}$$

Fala po odbiciu od linii napowietrznej 600Ω :

$$\underline{u}''_k = \underline{u}'_k \cdot \frac{Z_b - Z_k}{Z_b + Z_k} = 18,18 \cdot \frac{600 - 50}{600 + 50} = 15,38 \text{ kV}$$

Fala po odbiciu od linii napowietrznej 500Ω (drugie odbicie):

$$\underline{u}'''_a = \underline{u}''_k + \underline{u}'''_k = \underline{u}''_k \cdot \frac{2 \cdot Z_a}{Z_a + Z_k} = 15,38 \cdot \frac{2 \cdot 500}{500 + 50} = 27,96 \text{ kV}$$

