

Przebiegięcia w liniach elektroenergetycznych

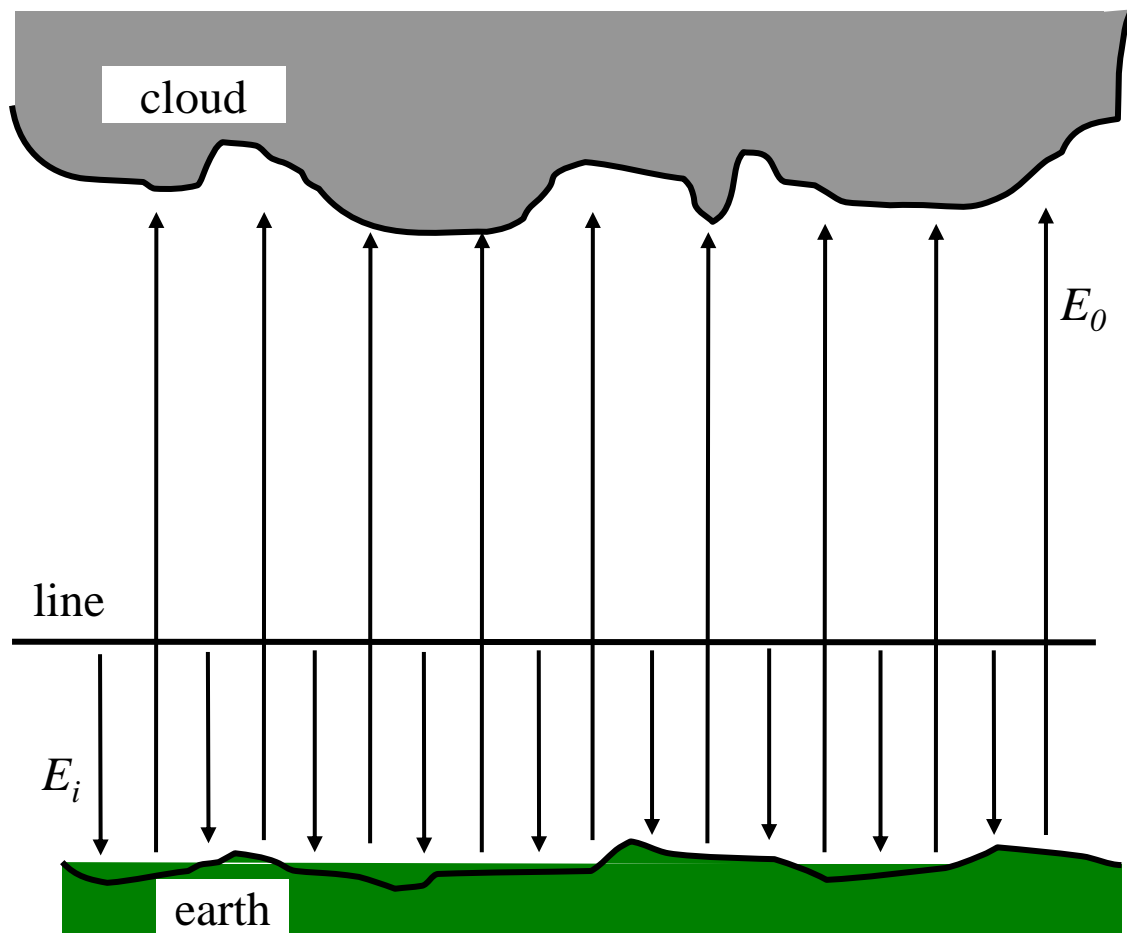
Wyróżnić należy dwa podstawowe przypadki uderzenia pioruna: uderzenie w pobliżu linii i uderzenie w jeden z elementów składowych linii. W pierwszym przypadku powstają przebiegięcia indukowane, w drugim zaś - oprócz przebiegów indukowanych - przebiegięcia bezpośrednie. Przebiegięcia indukowane nie są porównywalne z ogromnymi wartościami przebiegów bezpośrednich, jakie powstają przy uderzeniu pioruna w przewód fazowy linii, przewód odgromowy lub słup.

Przebiegięcia indukowane

Powstają przy uderzeniu pioruna obok linii, w ziemię lub w pobliski obiekt naziemny, rzadko osiągają wartości przekraczające 200 kV. Pojawiają się w wyniku nałożenia się na siebie dwóch stanów, a mianowicie stanu poprzedzającego wyładowanie główne i stanu związanego z przepływem ładunku w kanale wyładowania głównego.

W czasie poprzedzającym to wyładowanie, w związku z potrzebą kompensacji zewnętrznego pola elektrycznego w przestrzeni między przewodami linii i ziemią, na przewodach zostaje zgromadzony ładunek, dopływający do nich przez konduktancje poprzeczne linii.

W chwili wyładowania głównego, w związku z zanikiem pola zewnętrznego, ładunek ten zostaje uwolniony i dzieląc się na połowy odpywa w obie strony linii w postaci fal prądowych, którym towarzyszą fale przebiegięciowe.

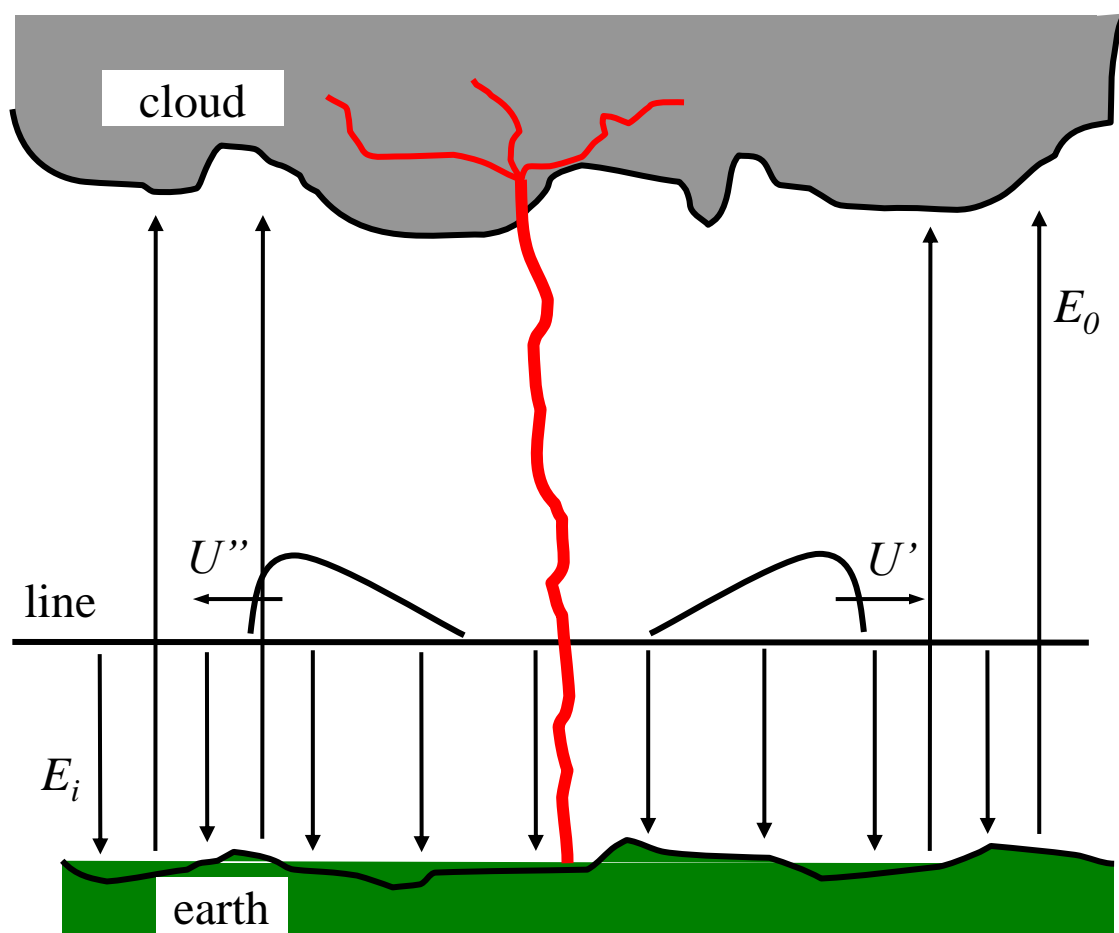


Powstawanie przepięć przy uderzeniu pioruna obok linii:

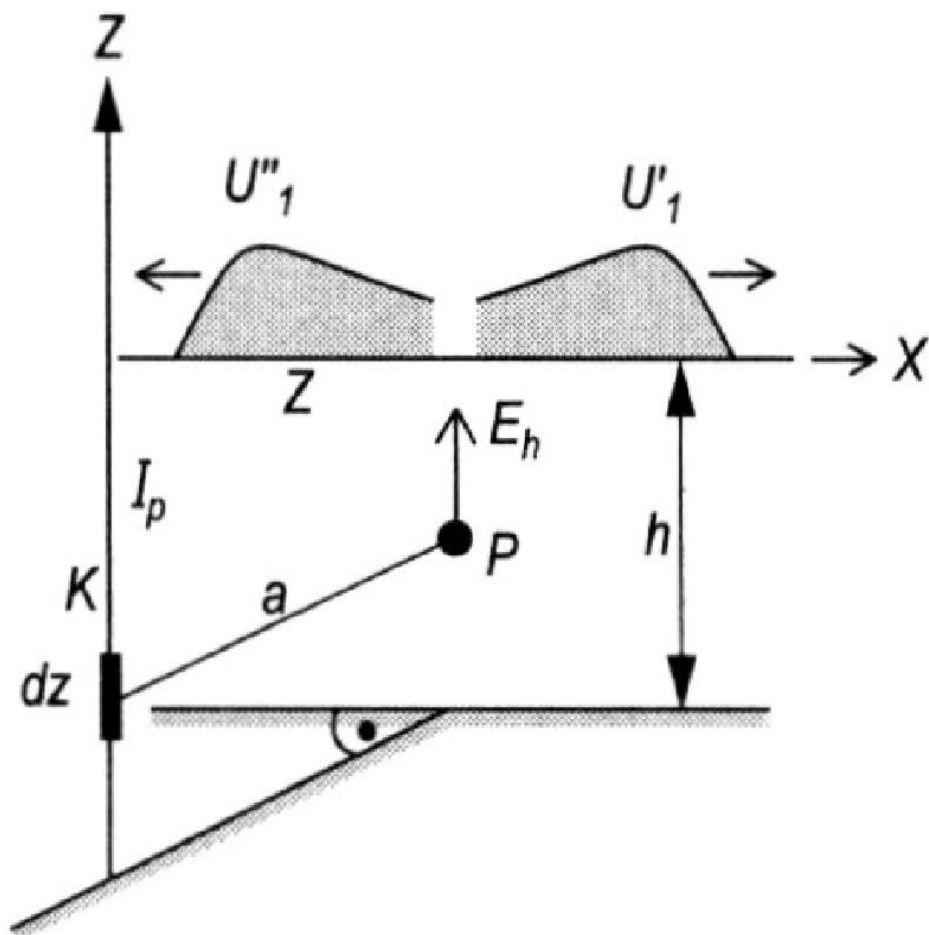
E_0 - pole elektryczne między chmurą a ziemią;

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

U' , U'' - składowe przepięcia indukowanego spowodowane zwarcie pola E_0 przez wyładowanie piorunowe

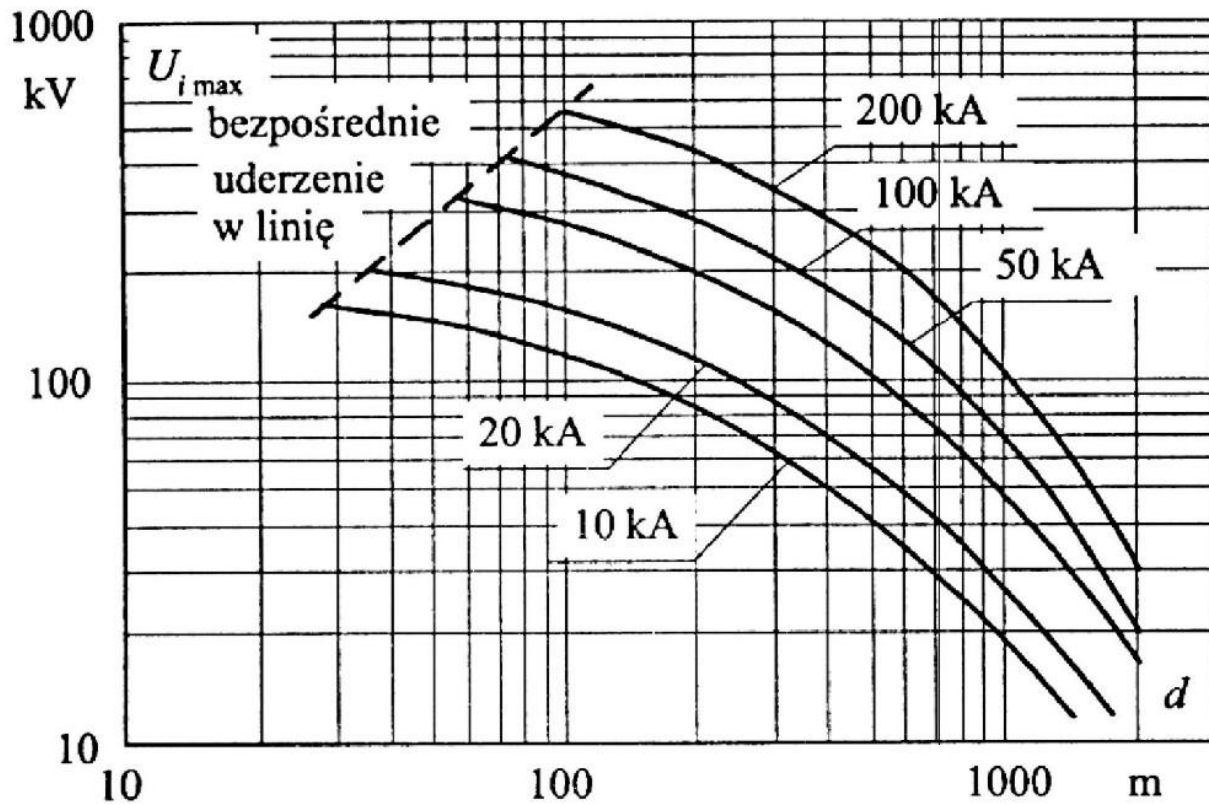


Na fale przejściowe U' i U'' , spowodowane odpływem ładunku zgromadzonego wcześniej na przewodach, nakładają się fale U'_1 i U''_1 napięcia indukowanego falą ładunku w kanale pioruna K .

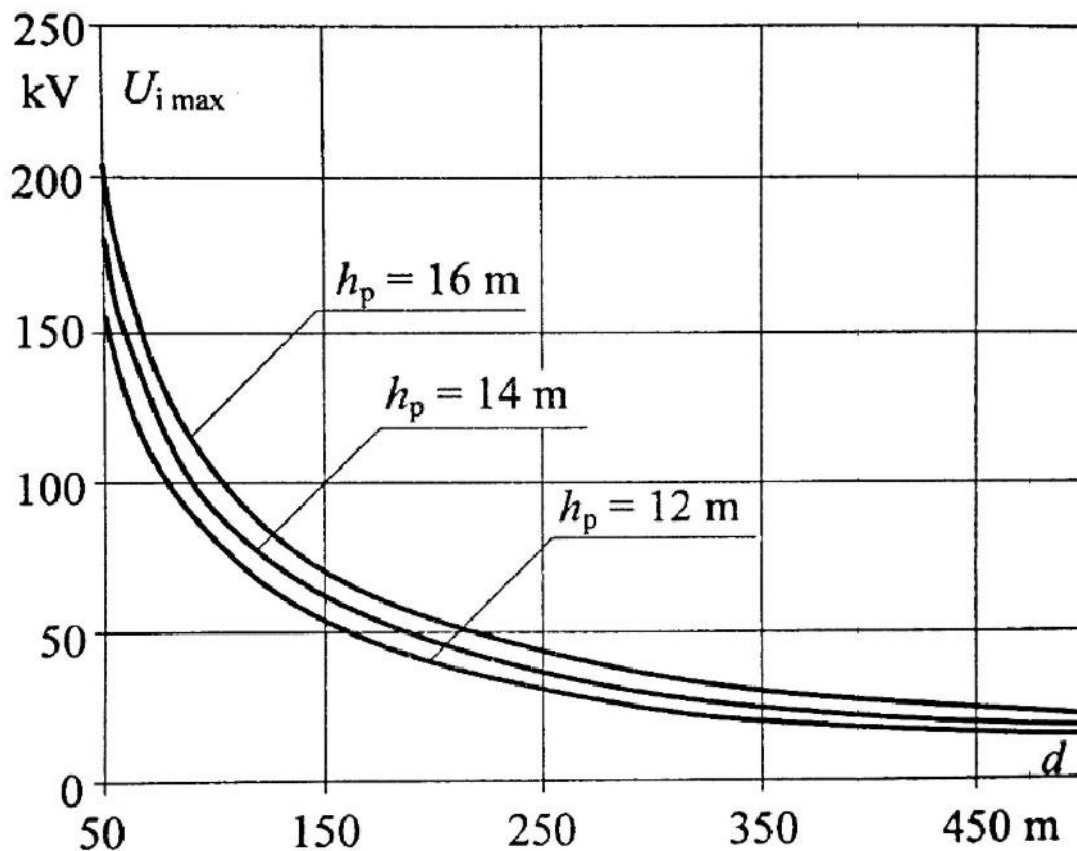


Powstawanie napięć przy uderzeniu pioruna obok linii:

składowe napięcia indukowanego U'_1 i U''_1
spowodowane falą ładunku w kanale pioruna K ,
który indukuje pole elektryczne między linią
i ziemią (punkt P)



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

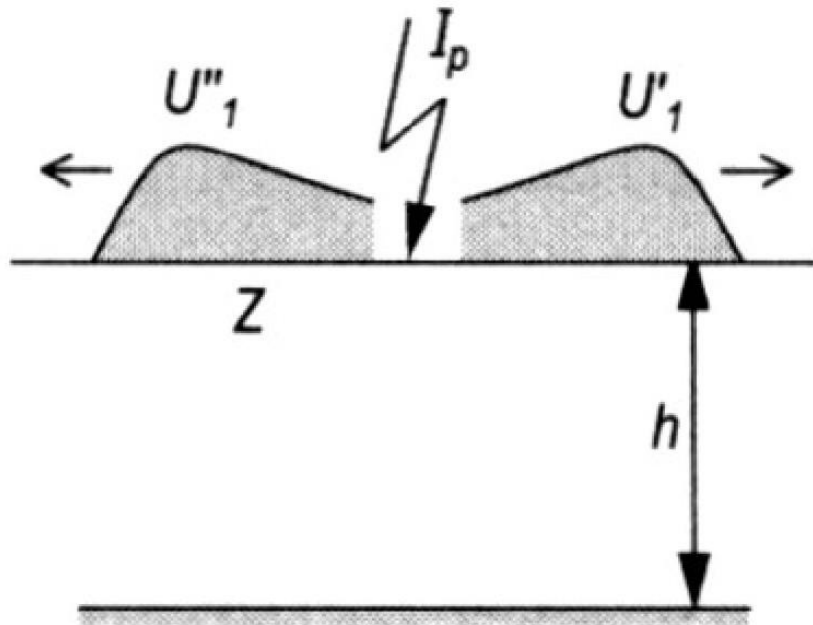
Przebiegi piorunowe bezpośrednie

Przebiegi bezpośrednie zależą od układu linii i od elementu, w który uderza piorun. Rozpatrzone zostaną 4 przypadki uderzeń piorunowych. Uwzględnione w nich będą napięcia związane z rozptyłem prądu piorunowego w układzie z pominięciem napięć indukowanych przez prąd w kanale wyładowania, gdyż są niewielkie w porównaniu z przebiegami bezpośrednimi.

Pierwszy przypadek. Piorun uderza w przewód roboczy linii o impedancji falowej Z . Prąd pioruna I_p dzieli się na dwie równe części i odpływa w obie strony przewodu. Z obydwoma falami prądu o wartości $I_p/2$ są związane napięcia o wartości:

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

Już przeciętna wartość szczytowa prądu pioruna $I_p = 25$ kA, w typowej linii napowietrznej o impedancji falowej $Z = 500 \Omega$, powoduje bardzo wysokie napięcie, osiągające wartość 6,25 MV. Nie ma żadnej szansy, że izolacja linii napięcie to wytrzyma.



Powstawanie przebiegów przy uderzeniu pioruna w przewód fazowy linii napowietrznej:

U'_1 i U''_1 - fale przebiegiowe spowodowane ładunkiem pioruna wpływającym do linii

Drugi przypadek. Piorun uderza w przewód odgromowy o impedancji falowej Z_1 , w pewnej odległości od słupa. W analogiczny sposób, jak w pierwszym przypadku, na przewodzie odgromowym powstają fale napięciowe o wartości:

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

Na równoległym przewodzie roboczym (o impedancji falowej Z_2) powstaje fala indukowana, określona zależnością:

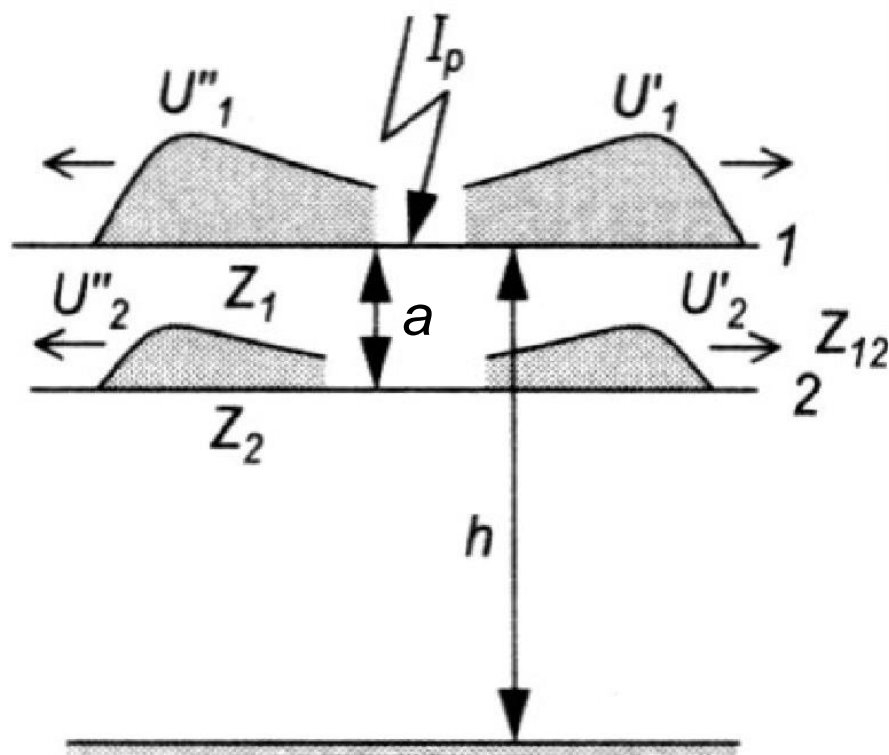
$$U'_2 = k \cdot U'_1$$

w której, zgodnie z rozkładem fal w liniach wieloprzewodowych, przy $h \gg a$, współczynnik sprzężenia przyjmuje postać:

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

gdzie r - promień przewodu odgromowego. Z_1 , Z_2 , Z_{12} - impedancje falowe, odpowiednio: przewodu odgromowego, przewodu fazowego, wzajemna (międzyprzewodowa). Napięcie U_{12} na izolacji linii wynika z różnicy napięć U'_1 i U'_2 , a zatem:

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



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

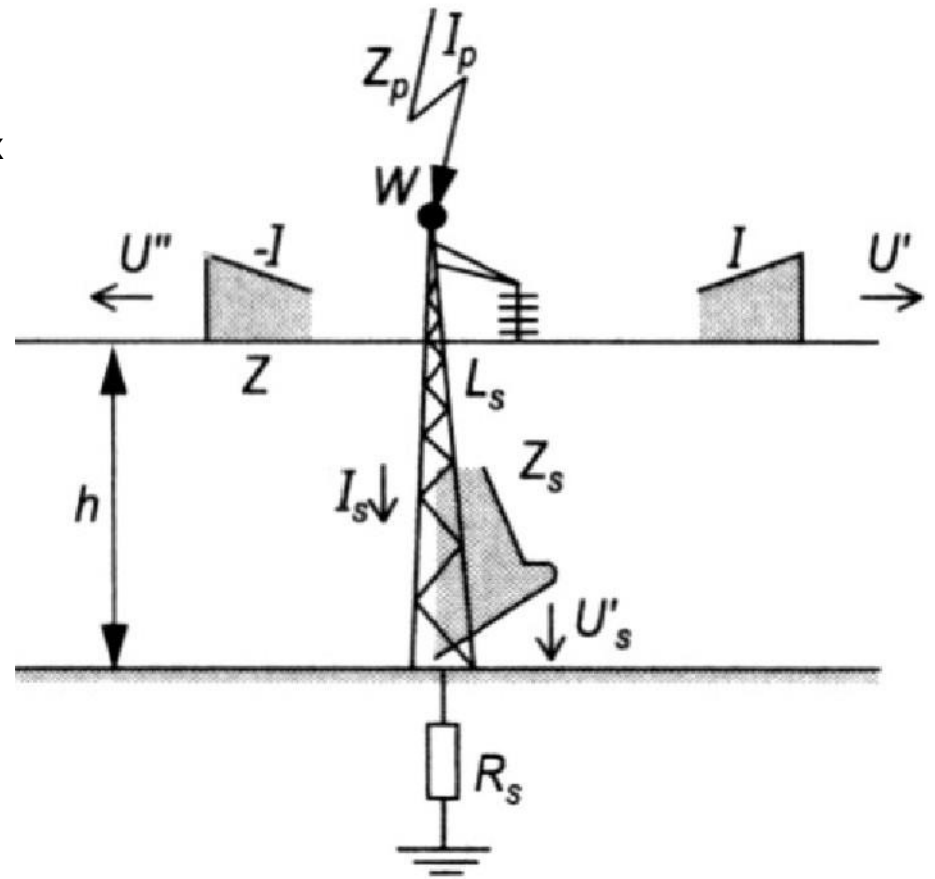
Trzeci przypadek. Piorun uderza w wierzchołek słupa bez przewodu odgromowego. Cały prąd piorunowy wpływa do słupa. W oparciu o indukcyjność L_S słupa oraz rezystancję jego uziemienia R_S , można obliczyć maksymalną wartość napięcia na jego wierzchołku:

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

Powstawanie przepięć przy uderzeniu pioruna w słup bez przewodu odgromowego;

U'_S - fala przepięciowa w słupie;

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



Przykład. Przyjmując do obliczeń średnie wartości parametrów prądu piorunowego oraz realne wartości rezystancji uziemienia i indukcyjności słupa:

$$I_{pm} = 25 \text{ kA}, \left(\frac{di_p}{dt} \right)_{\max} = 22 \text{ kA}/\mu\text{s}, R_S = 10 \Omega, L_S = 10 \mu\text{H}$$

oraz korzystając z powyższego wzoru otrzymujemy: $U_{wm} = 470 \text{ kV}$.

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

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

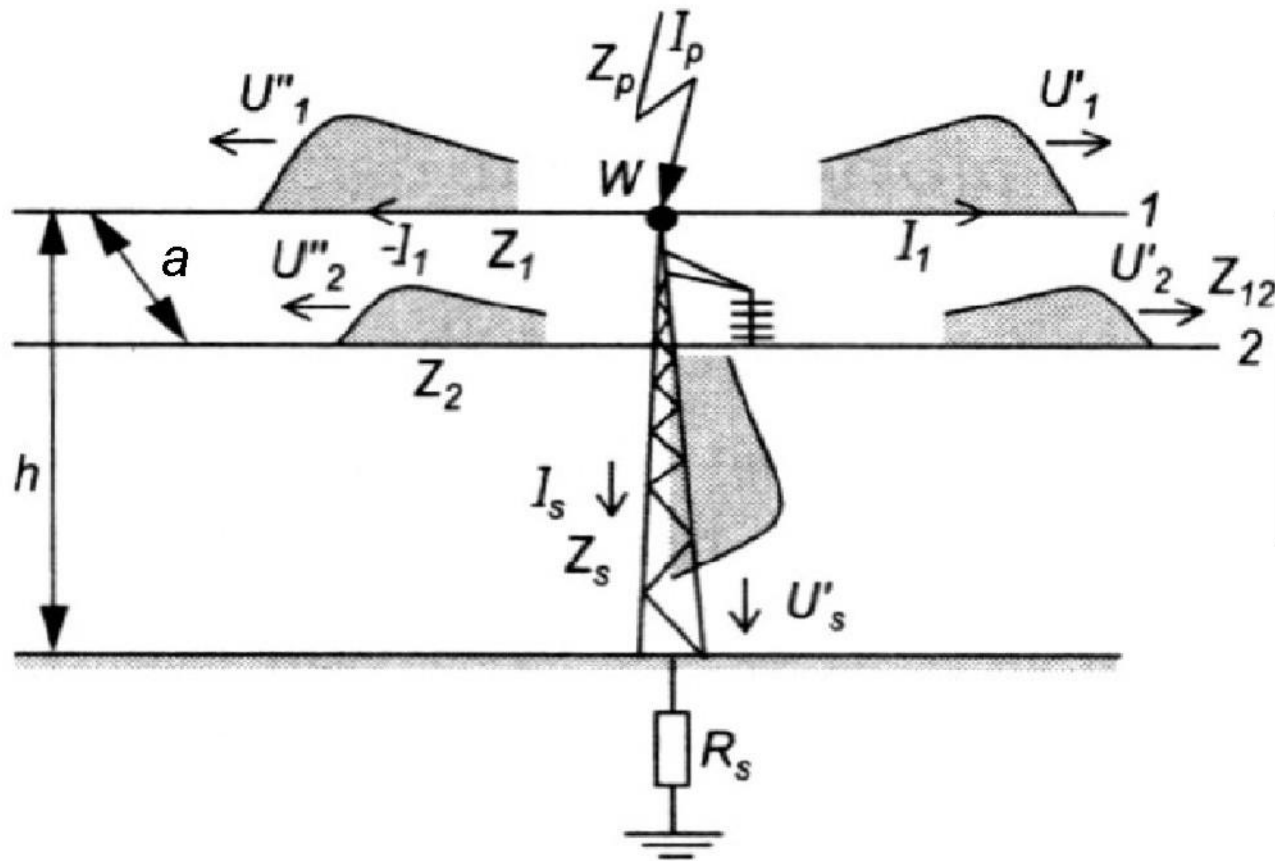
Porównanie tych dwóch wartości pozwala oszacować dopuszczalną wartość rezystancji uziemienia słupa R_s , przy której spodziewane wartości I_{pm} i $(di_p/dt)_{max}$ nie powodują przeskoku iskry, co wynika z następującego warunku:

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

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

$$U_u > R_s \cdot I_{pm} + L_s \left(\frac{di_p}{dt} \right)_{max}$$

Czwarty przypadek. Piorun uderza w wierzchołek słupa linii z przewodem odgromowym.



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

U'_s - fala przebiegowa w słupie,

U'_1 i U''_1 - fale przebiegowe w przewodzie odgromowym,

U'_2 i U''_2 - fale przebiegowe 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 słupie 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 :

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

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

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 w 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:

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

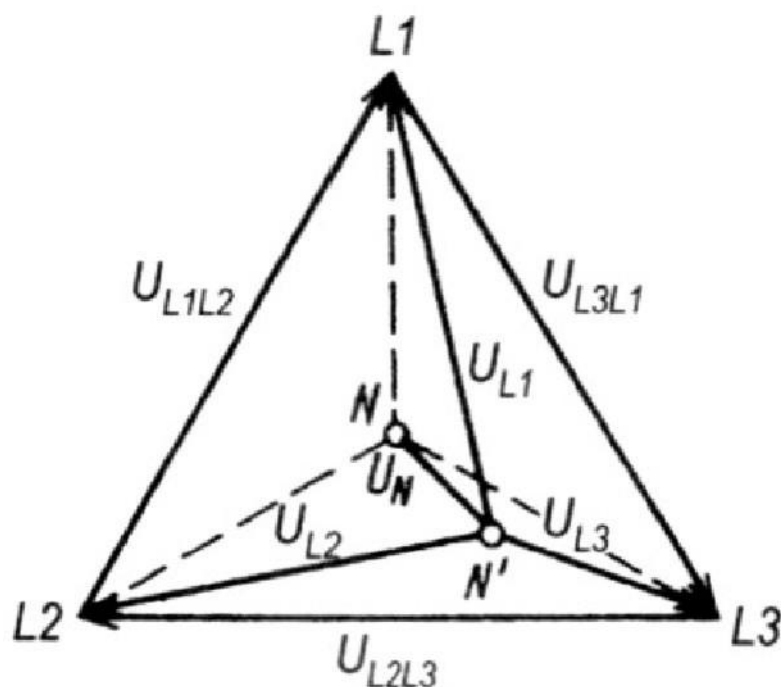
gdzie:

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

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

Przepięcia wewnętrzne dorywcze ziemnozwarciowe

Przepięcia ziemnozwarciowe wolnozmiennie są rozpatrywane w stanie ustalonym układu, po zaniku stanu przejściowego, przy trwałym zwarciu z ziemią przewodu fazowego.



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 zwarciem innej fazy 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:

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

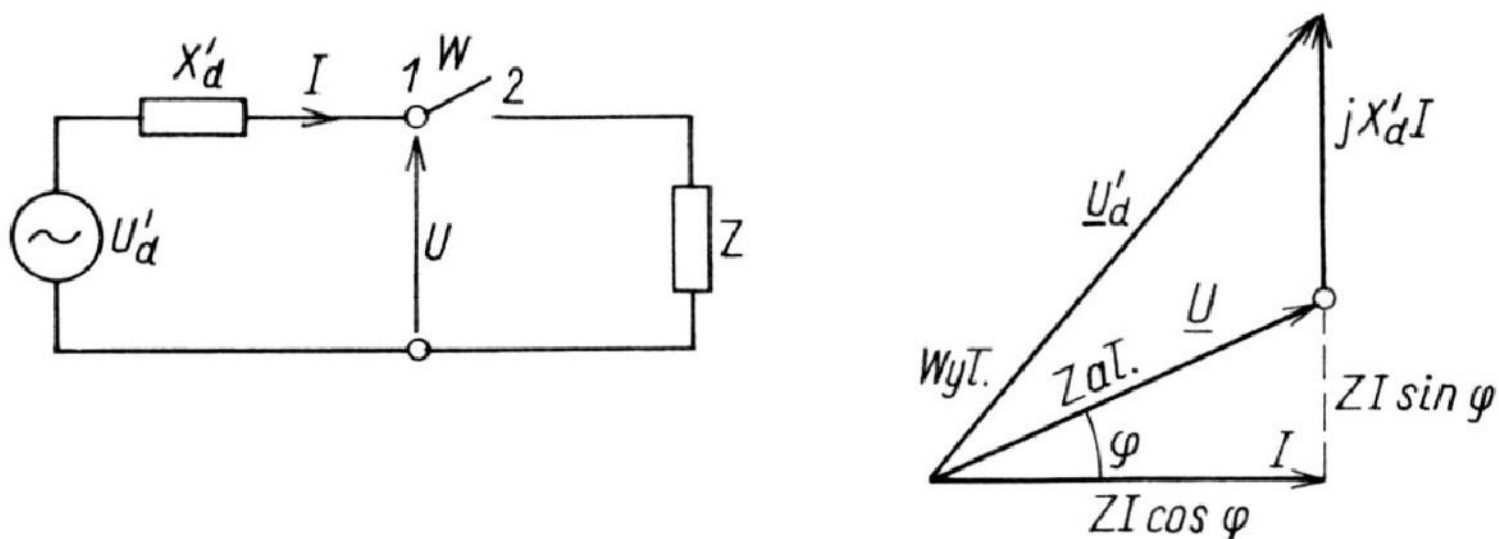
Przebiegi wewnętrzne dorywcze dynamiczne

Przebiegi dynamiczne należą do przebiegów wolnozmiennych, występujących w stanie ustalonym układu przy częstotliwości roboczej napięcia. Są one rezultatem procesów łączeniowych, po wystąpieniu których w pewnej części przełączonego układu zostaje przekroczone jego najwyższe napięcie robocze. Nie wykluczone są przy tym szybkozmiennie zjawiska przejściowe, ale stanowią one odrębne zagadnienie.

Do typowych procesów wywołujących przebiegi dynamiczne należą:

- nagłe odłączenie dużego obciążenia od generatora na końcu linii długiej;
- włączenie na napięcie przemiennie linii bardzo długiej nieobciążonej.

Przebiegi dynamiczne przy wyłączeniu dużego obciążenia



Ilustracja warunków powstania przebiegów dynamicznych po wyłączeniu odbiorów o dużej mocy

Po otwarciu wyłącznika W ustaje prąd płynący przez duże obciążenie Z i przez reaktancję X'_d , a w konsekwencji spadek napięcia na tej reaktancji staje się równy zero. Ponieważ regulator napięcia wzbudzenia generatora zadziała z pewnym opóźnieniem, następuje wzrost napięcia na zaciskach wyłącznika ponad najwyższą wartość napięcia roboczego.

Stosunek napięcia generatora U'_d po wyłączeniu obciążenia do napięcia U przed jego wyłączeniem, zwany współczynnikiem przebieg dynamicznych k_d , może być - zgodnie z wykresem - wyrażony zależnością:

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

w której $+\sin \varphi$ przy obciążeniu indukcyjnym, a $-\sin \varphi$ przy obciążeniu pojemnościowym. Duże wartości k_d , nawet większe niż 2, mogą wystąpić na końcu linii o długości kilkuset kilometrów, po wyłączeniu odbiorów o mocy kilkuset megawatów. Na zaciskach generatorów szybkobieżnych można się spodziewać wartości $k_d \leq 1,3$, a generatorów wolnobieżnych (z biegunami jawnymi) - $k_d \leq 1,8$.

Przebiegi dynamiczne przy załączeniu linii długiej nieobciążonej

Przy włączeniu bardzo długiej linii (nieobciążonej) na napięcie robocze, przebiegi dynamiczne przyjmują postać fali stojącej, będącej rezultatem nakładania się fali odbitej na końcu linii na falę przychodzącą. Amplituda napięcia U_2 na końcu linii jest większa od amplitudy napięcia U_1 na początku linii.

Współczynnik przebiegów można obliczyć korzystając ze wzoru:

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

gdzie:

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

x - długość linii,

f - częstotliwość napięcia roboczego,

v - prędkość fali.

Przykład

Dla następujących danych:

$$x = 600 \text{ km}, f = 50 \text{ Hz}, v = 300 \cdot 10^3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1},$$

otrzymujemy:

$$k_d = 1,24$$

Przebiegi wewnętrzne dorywcze rezonansowe

Przebiegi przy rezonansie szeregowym w obwodzie liniowym

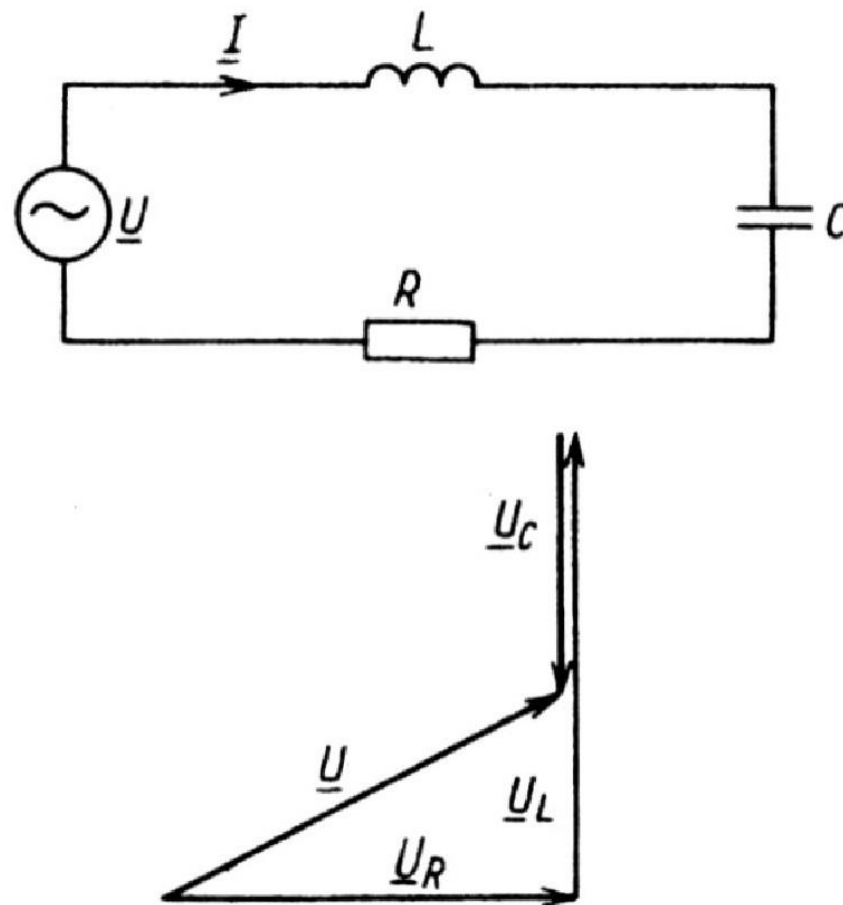
Przeciwny układ spadków napięć o charakterze indukcyjnym i pojemnościowym sprawia, że w stanie ustalonym, po załączeniu obwodu RLC na napięcie U , napięcia składowe U_L i U_C na elementach L i C mogą okazać się znacznie większe od napięcia źródła. Największe wartości napięć składowych $U_L = -U_C$ występują w obwodzie w warunkach rezonansu:

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

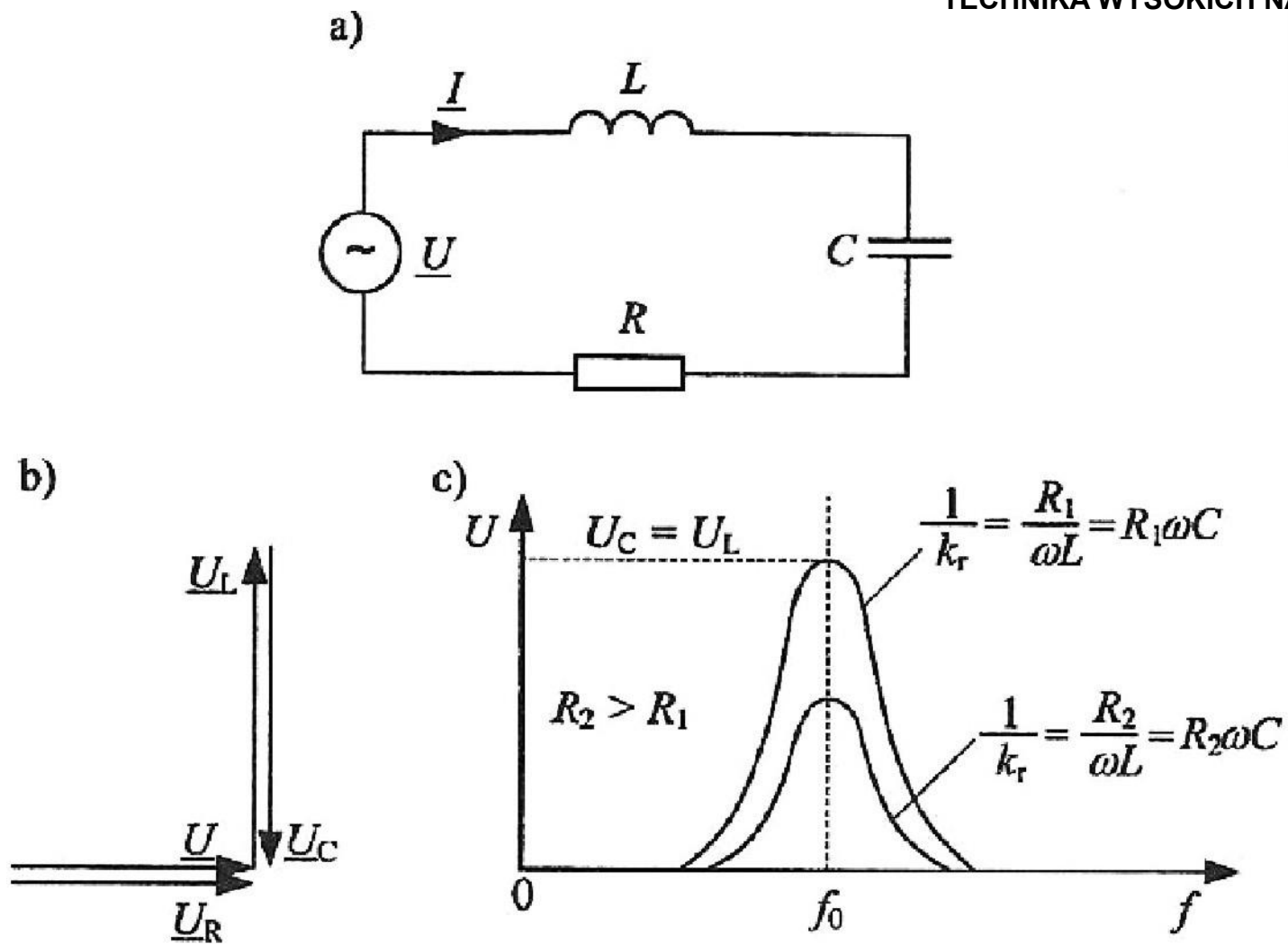
Współczynnik przebiegów:

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

Wartość k_r może dochodzić do 3.



Ilustracja przebiegów rezonansowych;
układ i wykres wskazowy



Ilustracja idealnego rezonansu napięć:

a) układ elektryczny,

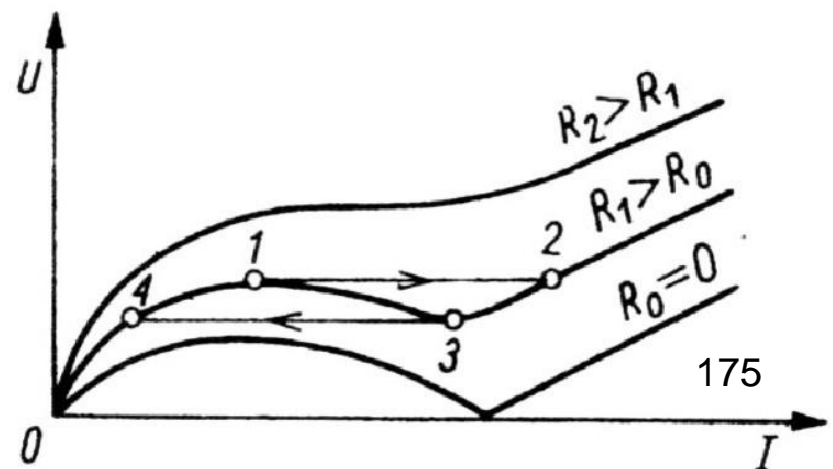
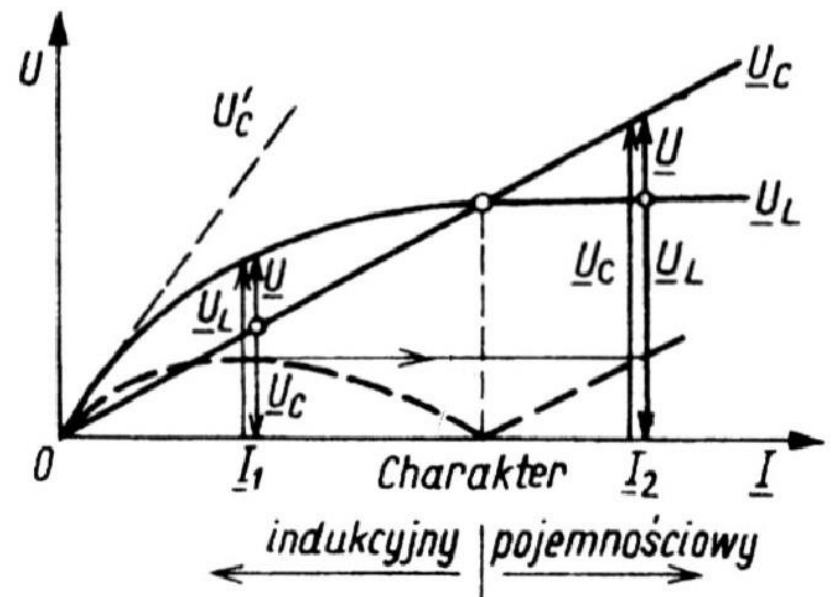
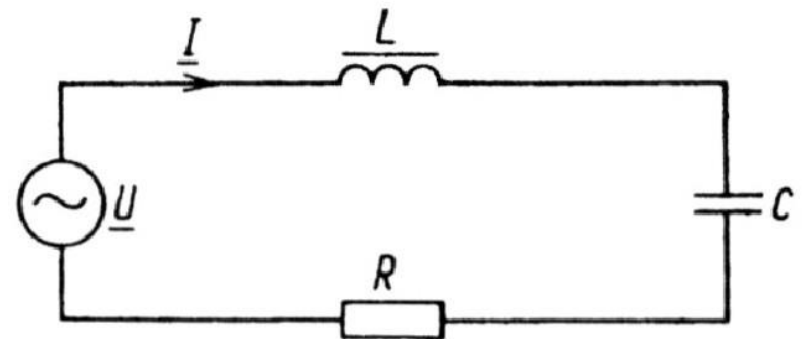
b) wykres wskazowy,

c) charakterystyka częstotliwościowa napięcia.

Przebiegi ferreznansowe

Wzrost amplitudy napięcia zasilania może spowodować przebiegi ferreznansowe w obwodzie, w którym występuje element indukcyjny z nasycającym się rdzeniem.

Gdy stromość początkowa charakterystyki $U_L = f(I)$ jest większa od stromości charakterystyki $U_C = f(I)$, ze wzrostem napięcia źródła U wzrasta prąd I , a wraz z nim napięcia U_L i U_C , przy czym gdy $R = 0$, musi być spełniony warunek: $|U| = |U_L - U_C|$. Po osiągnięciu wartości $I > I_1$ warunek ten nie może być spełniony, gdyż - ze względu na charakter zmian U_L i U_C - ich różnica nie może zwiększać się ze wzrostem U . Wymuszenie wyższej wartości tego napięcia powoduje skokowy wzrost prądu do wartości I_2 , a przez to i skokowy wzrost napięć U_L i U_C ze zmianą znaku na przeciwny, zwaną przewrotem, po którym nadal zostaje zachowany warunek $|U| = |U_L - U_C|$. Obciążenie obwodu zmienia charakter z indukcyjnego na pojemnościowy.



Ilustracja przebiegów
ferrorezonansowych:
układ i charakterystyki

Przebiegi wewnętrzne łączeniowe awaryjne

Przebiegi ziemnozwarciowe szybkozmienne

Przebiegi te są rezultatem procesów przejściowych towarzyszących zwarciu przewodu z ziemią. W procesach tych, na napięcie robocze nakładają się przebiegi oscylacyjne tłumione o częstotliwości drgań własnych układu, zwykle znacznie wyżej od częstotliwości roboczej.

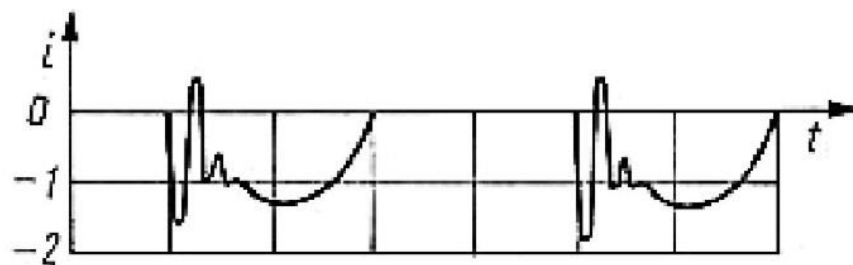
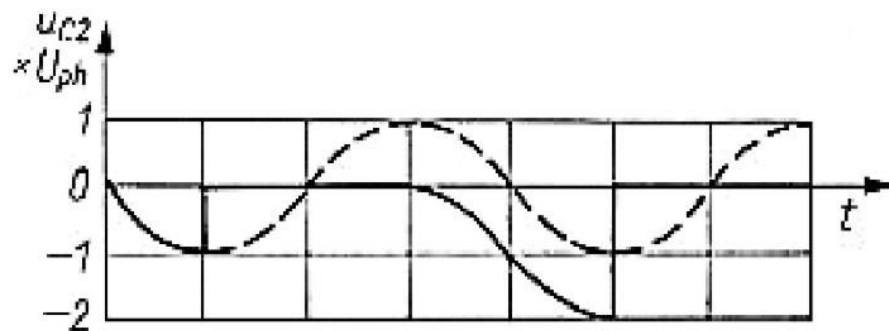
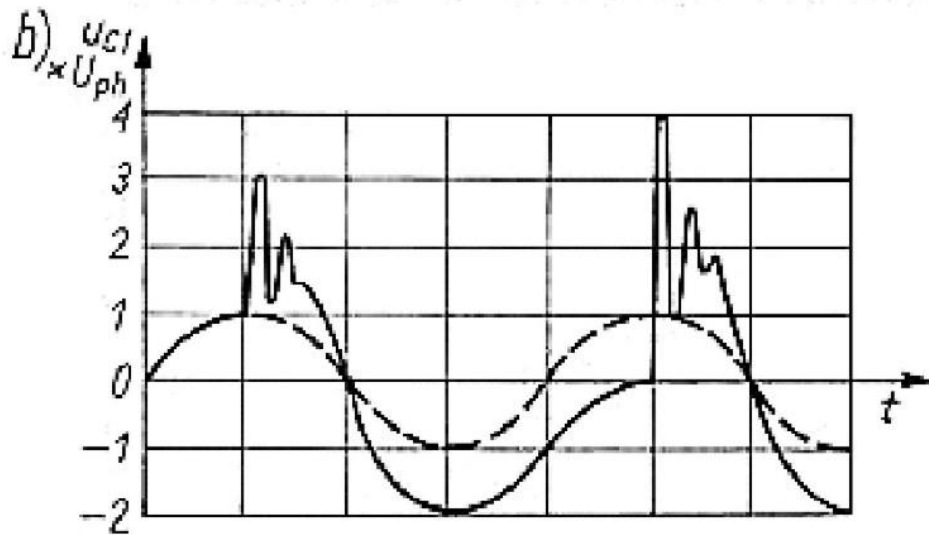
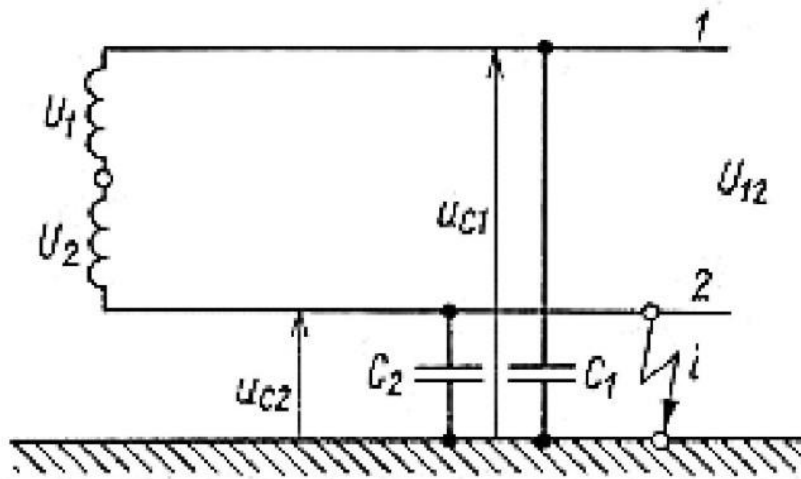
W układach z izolowanym punktem neutralnym, w pewnym zakresie wartości pojemnościowego prądu zwarciovego, występują wielokrotne zapłony łuku i związane z nimi procesy przejściowe. Doładowywanie w tych procesach pojemności układu prowadzi do wzrostu przebiegów.

Istnieją dwie wersje wyjaśnienia mechanizmu tych przebiegów:

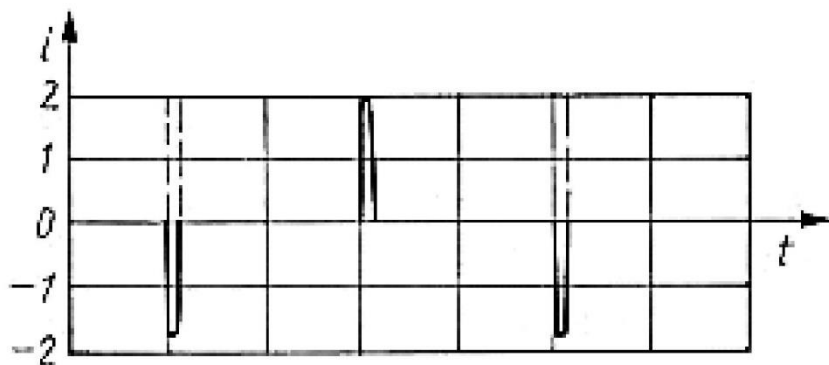
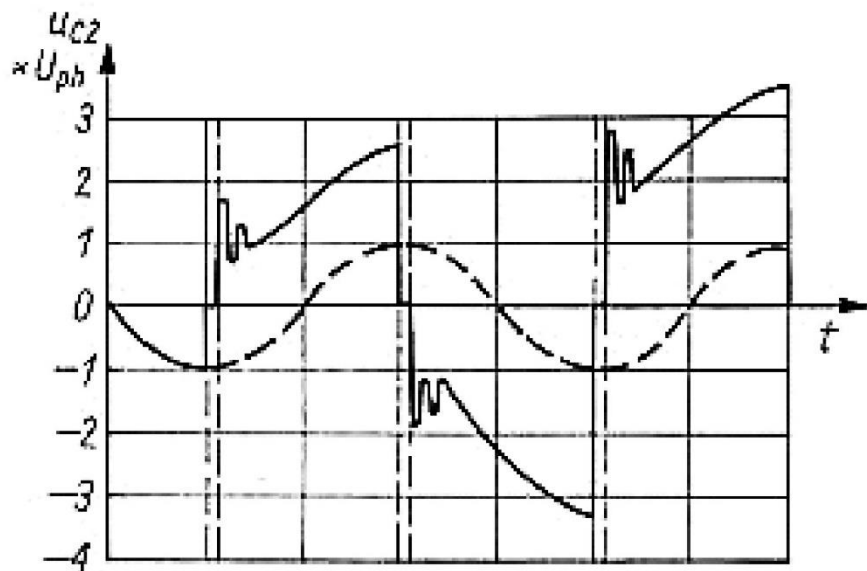
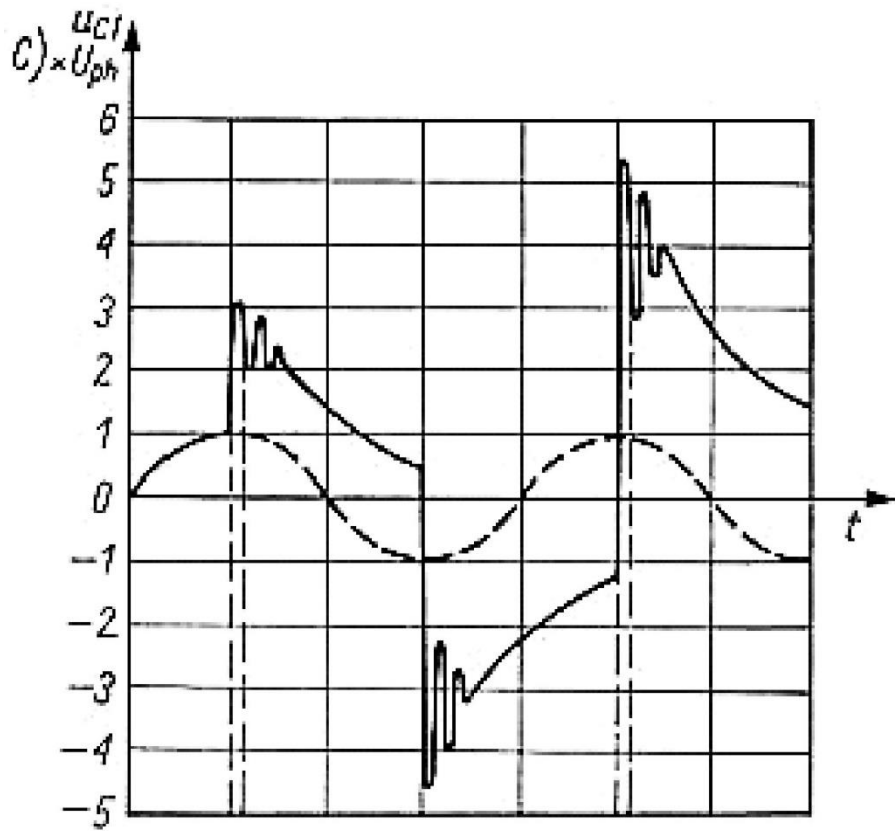
- wersja Petersa i Slepiana, w której zakłada się, że łuk gaśnie przy przejściu przez zero składowej wolnozmiennego prądu zwarciovego;
- wersja Petersena, zakładająca gaśnięcie łuku przy przejściu przez zero składowej szybkozmiennej (oscylacyjnej) prądu zwarciovego.

Zwarcie łukowe występuje w chwili, gdy napięcie robocze przewodów osiąga wartość szczytową. Na zwartej pojemności C_2 napięcie obniża się do zera. Pojemność C_1 doładowuje się oscylacyjnie do napięcia międzyprzewodowego U_{12} , osiągając przejściowo wartość równą $3U_{ph}$. Dalszy przebieg napięcia jest uzależniony od założeń jednej z dwóch wersji.

a)



Według założeń Petersa i Slepiana napięcie przewodu 1, po zaniku oscylacji, spada do wartości $-2U_{ph}$. Równocześnie prąd zwarciaowy o częstotliwości podstawowej przechodzi przez zero i łuk gaśnie. Napięcie przewodu 2 zmienia się od zera do wartości $-2U_{ph}$. Przy tej wartości następuje ponowny zapłon łuku. Napięcie przewodu 2 osiąga zero, a przewodu 1 wzrasta do wartości $2U_{ph}$ w wyniku oscylacji o amplitudzie $4U_{ph}$. W kolejnych okresach proces się powtarza.



Według założeń Petersena napięcie przewodu 1, po zaniku oscylacji, obniża się do wartości $0,5U_{ph}$. Napięcie przewodu 2 zaś, po przejściu przez zero składowej szybkozmiennej prądu zwarciovego i po zgaśnięciu łuku (rozwarciu pojemności C_2), wzrasta oscylacyjnie do wartości równej $2,5 U_{ph}$. Przy tej wartości następuje ponowne zwarcie pojemności C_2 i doładowanie pojemności C_1 do napięcia chwilowego równego $-4,5U_{ph}$, w chwili przejścia przez zero kładowej szybkozmiennej prądu zwarciovego i zgaśnięcia łuku. Po jego zgaśnięciu napięcie przewodu 1 zmienia się oscylacyjnie do wartości $-1,25U_{ph}$, a napięcie przewodu 2 do $-3,25U_{ph}$. W kolejnych półokresach proces się powtarza. W ocenie teoretycznej napięcie przewodu 1 wzrasta do $6U_{ph}$, a przewodu 2 do $4U_{ph}$.

Oba przedstawione mechanizmy mają charakter teoretyczny. W rzeczywistych układach występują mniej precyzyjne zapłony i gaśnięcia łuku.

Przebiegi wewnętrzne łączeniowe manewrowe

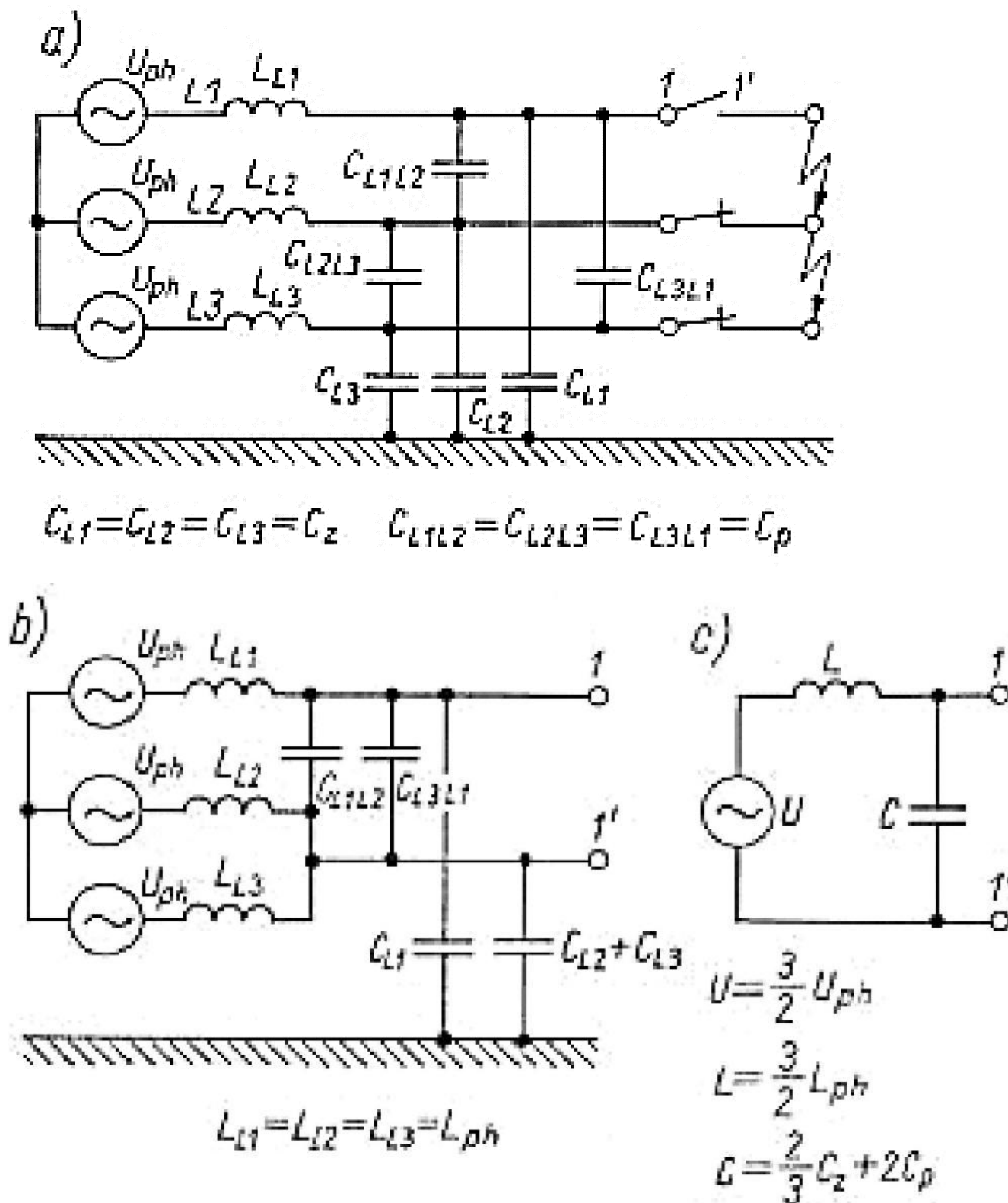
Przebiegi przy wyłączaniu prądów zwarciovych

Wyłączenie zwarcia w układzie trójfazowym wymaga przerwania prądu przez 3 zestyki wyłącznika. W chwili otwarcia zestyku pojawia się łuk, który gaśnie przy wartości zerowej prądu. Przesunięcie prądów w fazie sprawia, że jeden z zestyków uzyska stan bezprądowy jako pierwszy.

W obwodzie o zmienionej w ten sposób konfiguracji wystąpi proces przejściowy, w którym szybkozmienne oscylacje tłumione nałożą się na przebiegi o częstotliwości podstawowej, powodując przebiegi na różnych elementach układu. Zwykle jednak chodzi o skuteczność gaszenia łuku, a więc o napięcie między rozłączanymi stykami zestyku wyłącznika, zwane *napięciem powrotnym*.

Analizę przebiegów napięciowych na otwartym zestyku jednej fazy wyłącznika, gdy w pozostałych fazach następuje jeszcze przepływ prądu, ułatwia przekształcenie układu trójfazowego w równoważny układ jednofazowy.

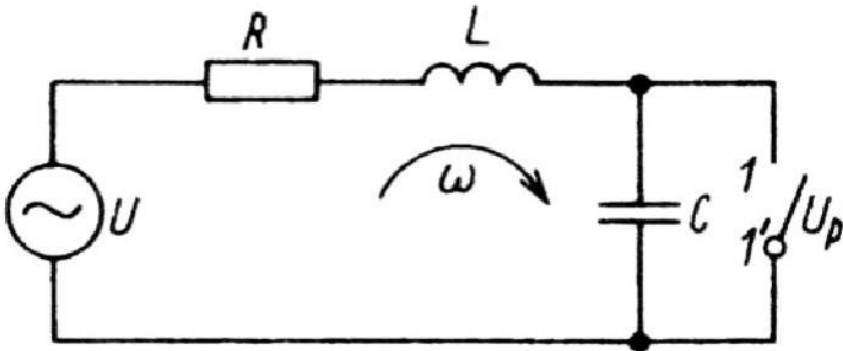
Otrzymany układ jest obwodem jednoczęstotliwościowym. Zwykle obwód taki nie jest pozbawiony rezystancji szeregowych, powodujących szybkie wytłumienie przebiegu przejściowego.



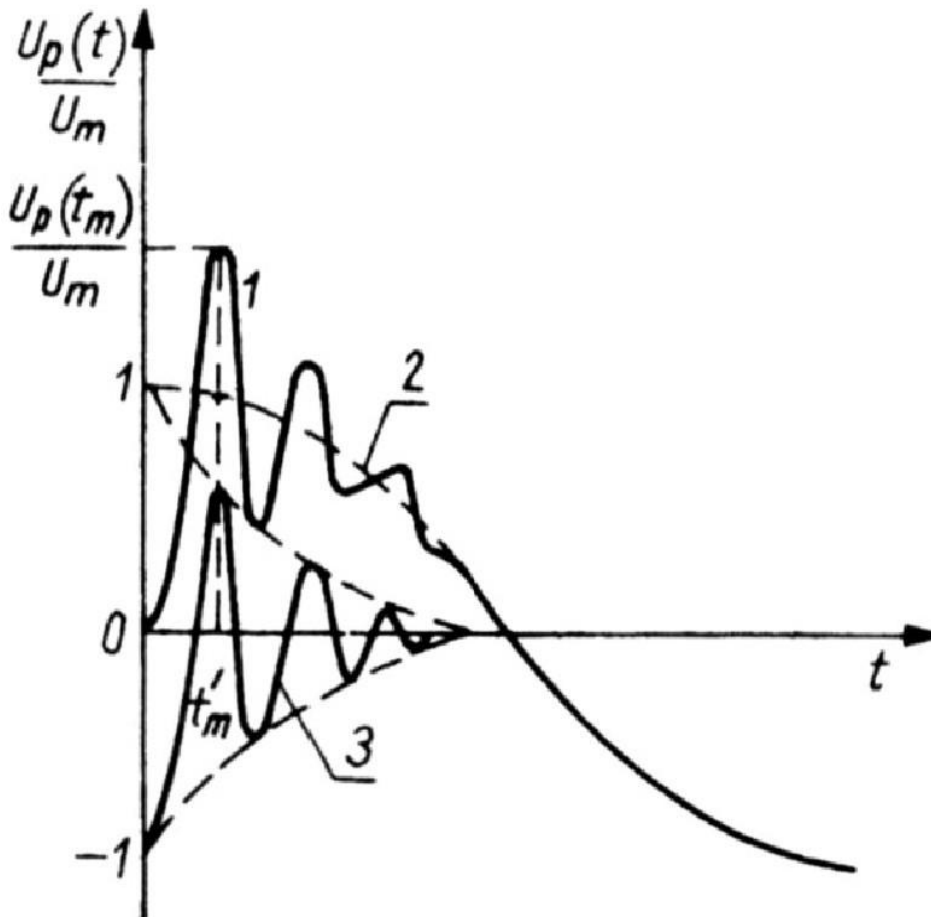
Schematy układu ze zwarcim na stykach łącznika:

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

Niżej przedstawiono przypadek przerwania łuku przy maksymalnej wartości napięcia źródła U_m , co w obwodach indukcyjnych (przed rozwarciem pojemności C) odpowiada przejściu prądu przez zero. Częstotliwość drgań własnych obwodu jest znacznie większa od częstotliwości zmian napięcia źródła.



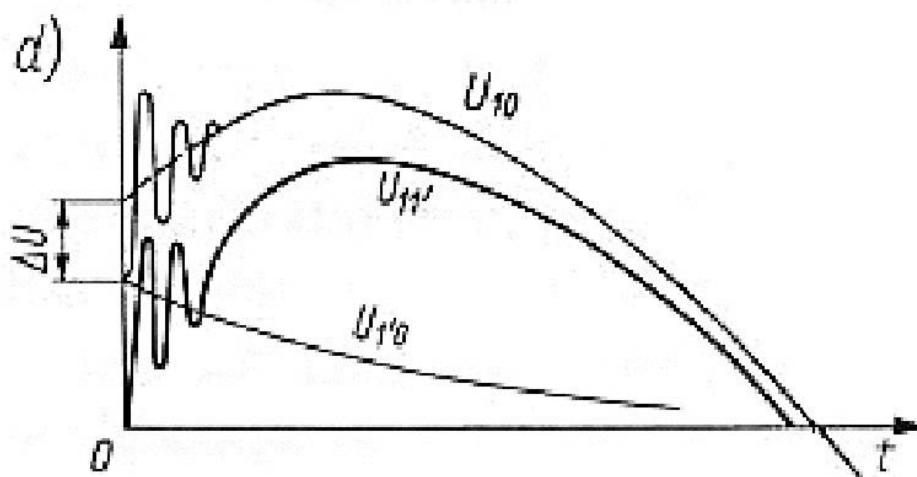
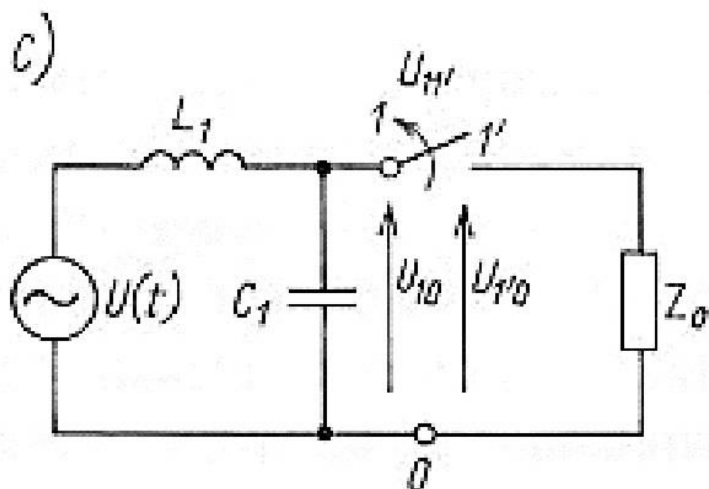
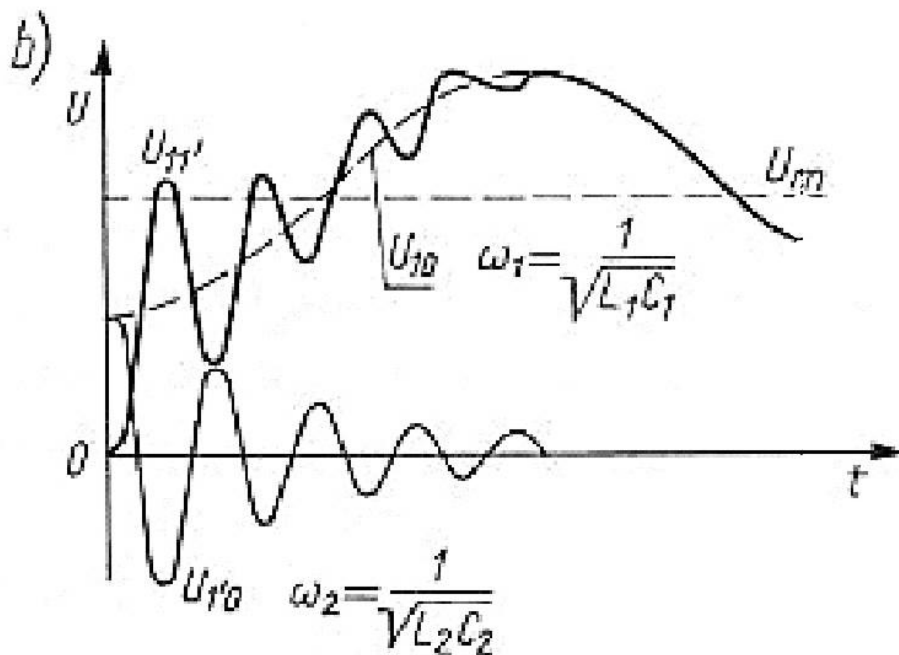
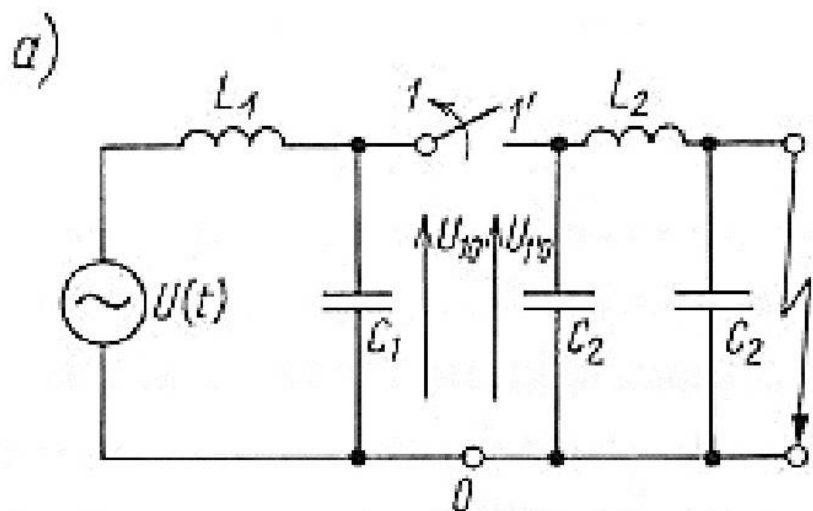
$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$



Otwarcie łącznika w chwili przejścia napięcia źródła przez maksimum:

- 1 - przebieg napięcia powrotnego,
- 2 - składowa podstawowa 50 Hz,
- 3 - składowa przejściowa.

W przypadku wyłączenia zwarć powstających nie na zaciskach wyłącznika, lecz w większej od niego odległości lub za dławikiem, przebiegi napięciowe są bardziej złożone, gdyż w kształtowaniu napięcia powrotnego dodatkowo biorą udział oscylacje występujące w części obwodu za wyłącznikiem.

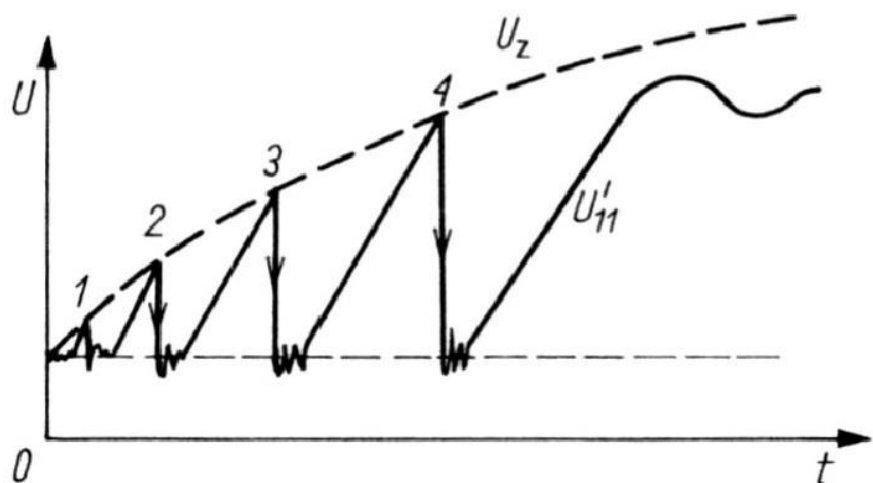
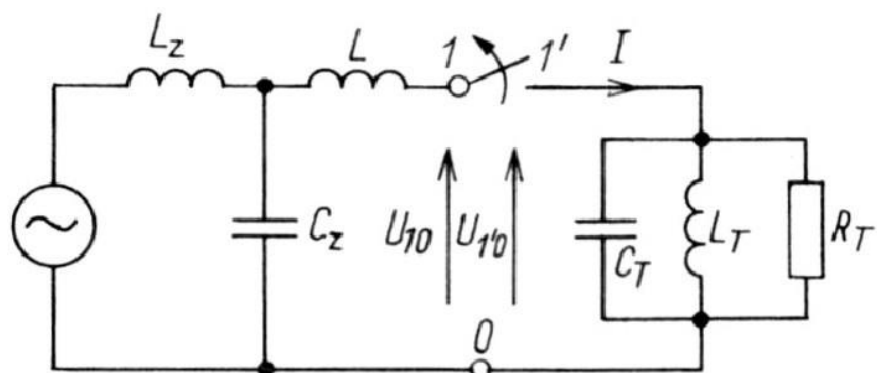


Układ wyłączenia zwarć za dławikiem (a) i przebiegi napięć (b) oraz układ wyłączenia prądów roboczych (c) i przebiegi napięć (d)

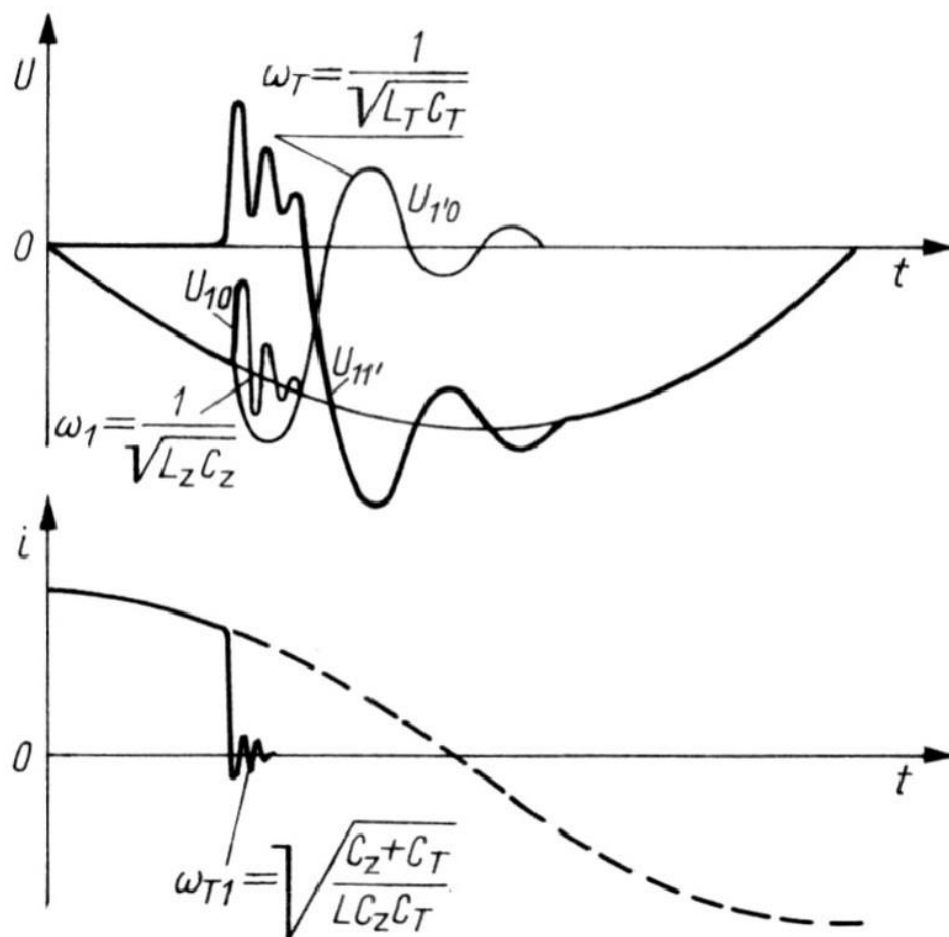
Przebiegi przy wyłączaniu małych prądów indukcyjnych

Otwieranie zestyku wyłącznika może doprowadzić do przerwania prądu przed jego naturalnym przejściem przez zero, gdy wartość prądu nie przekracza kilkunastu amperów. Takim przypadkiem jest prąd indukcyjny płynący w obwodzie nieobciążonego transformatora.

Niżej przedstawiono jednofazowy obwód transformatora w stanie jałowym i przebiegi towarzyszące przerwaniu przepływu prądu w nim.



Odłączanie transformatora; schemat i przebieg napięcia na wyłączniku przy ponownych zapłonach łuku:
 U_z - charakterystyka zapłonowa;
 1, 2, 3, 4 - kolejne zapłony łuku



Odłączanie nieobciążonego transformatora; przebiegi prądu i składowych napięcia powrotnego

W chwili przerwania przepływu prądu ($I = I_m \sin \psi$) w układzie transformatora istnieje energia magnetyczna, proporcjonalna do kwadratu prądu (przy pominięciu rozproszenia w rezystancji R_T), oraz energia elektryczna, proporcjonalna do kwadratu napięcia:

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

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

gdzie:

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 jest równa energii zgromadzonej w pojemności transformatora, a zatem:

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

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:

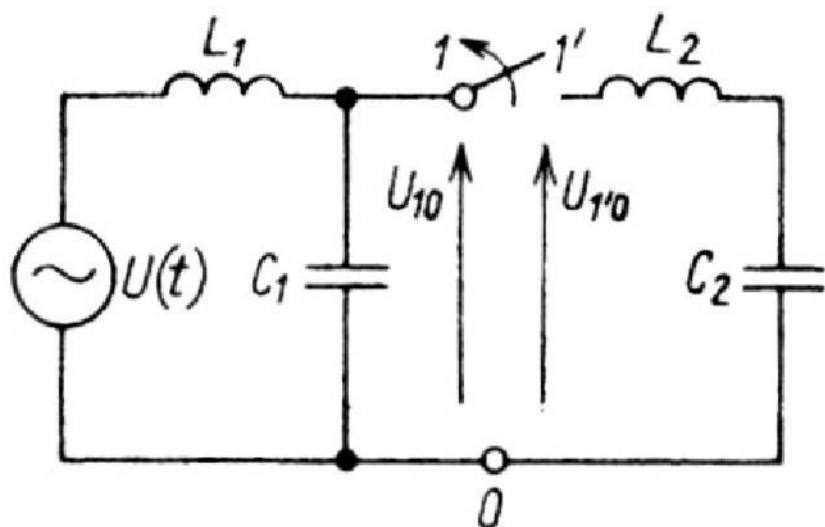
$$U_{11'}(t) = U_m \cos(\omega t + \psi) + \\ - \left(U_m \cos \psi \cos \omega_T t - I_m \sin \psi \sqrt{\frac{L_T}{C_T}} \sin \omega_T t \right) e^{-\alpha \omega_T t}$$

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

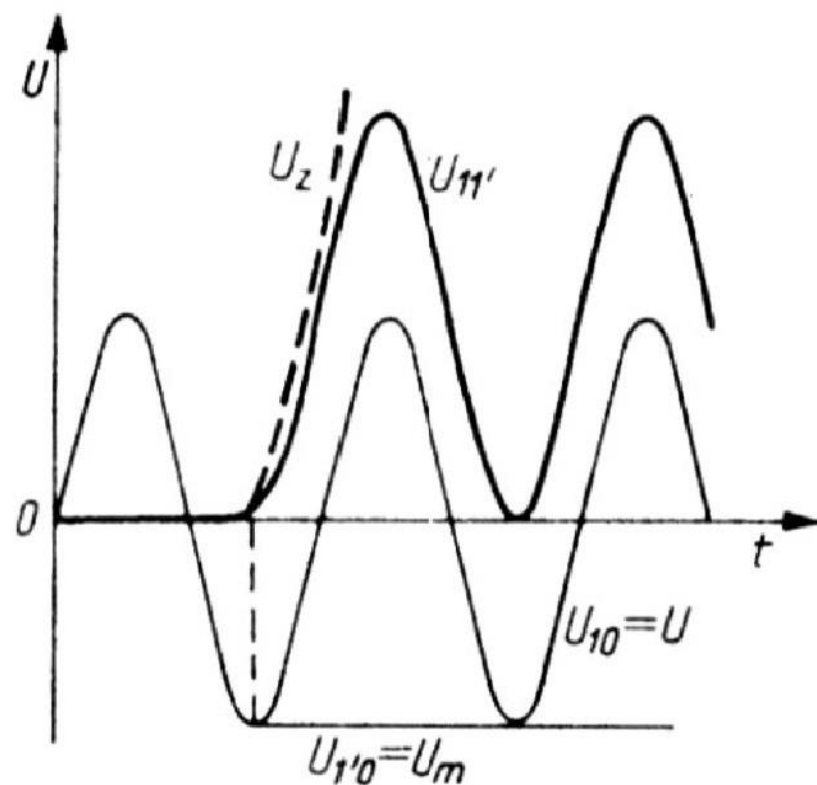
ω - pulsacja podstawowa ($f = 50$ Hz).

Przebiegi przy wyłączaniu prądów pojemnościowych

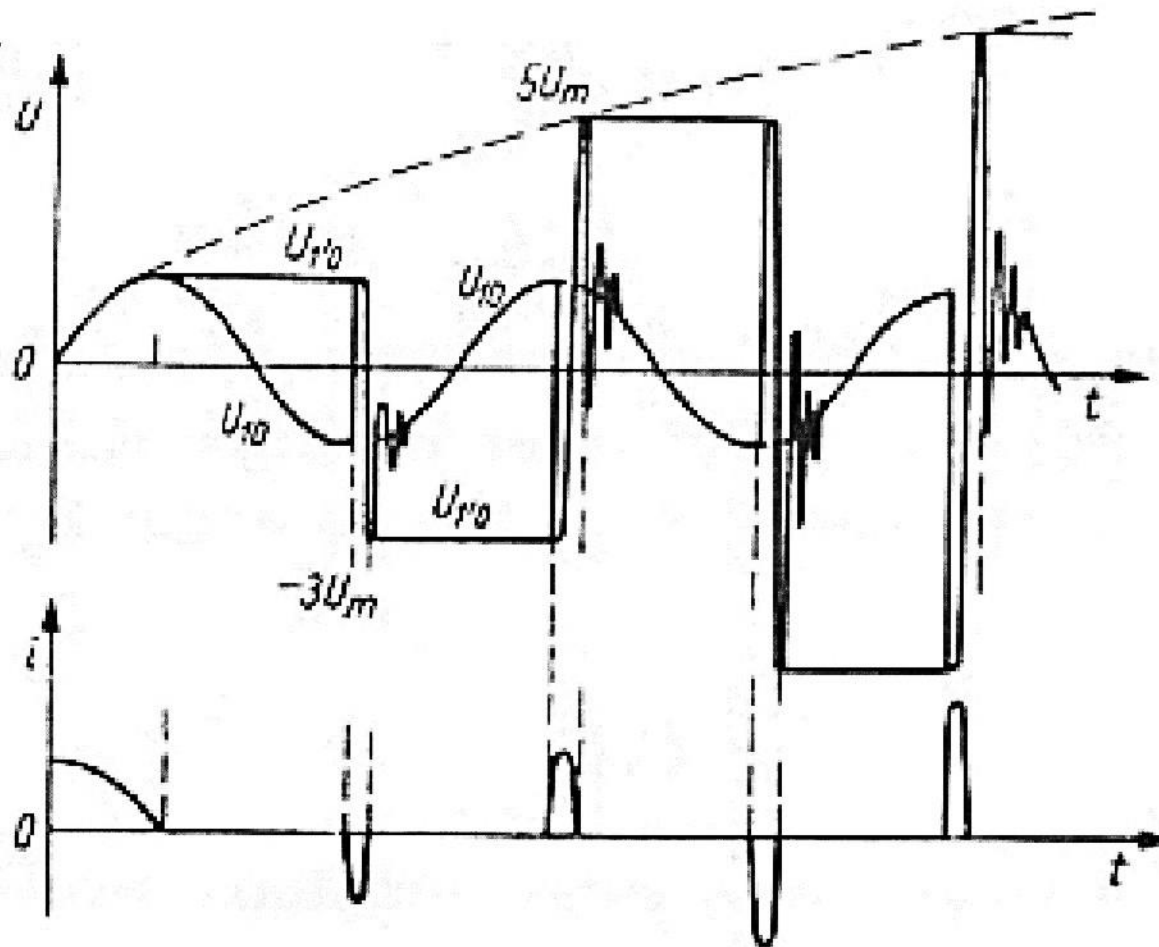
Odłączaniu pojemności skupionych lub nieobciążonej linii długiej od źródła zasilania mogą towarzyszyć znaczne napięcia między stykami otwartego zestyku wyłącznika, zwłaszcza wówczas, gdy występują tam ponowne zapłony łuku.



Obwód z odłączaną pojemnością zastępczą C_2 od źródła dużej mocy



Przebiegi napięcia przy odłączaniu pojemności skupionej od źródła dużej mocy (małe L_1)



Przebiegi przy wyłączeniu linii nieobciążonej w chwili przejścia przez zero szybkozmiennej składowej prądu pojemnościowego