

PRZEPIĘCIA

Wprowadzenie

przepięcie - wzrost napięcia w urządzeniu elektrycznym powyżej jego najwyższego napięcia roboczego

współczynnik przepięć - wyraża amplitudę przepięć U_{pm} jako krotność amplitudy najwyższego napięcia roboczego urządzenia 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

wartość k_p zależy od:

- rodzaju przepięć
- rodzaju urządzeń
- miejsca występowania w układzie elektrycznym

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, ferrorezonans

łączeniowe (szybkoszmiennie) $k_p = 2...4$

manewrowe przyczyna: zamierzone czynności łączeniowe

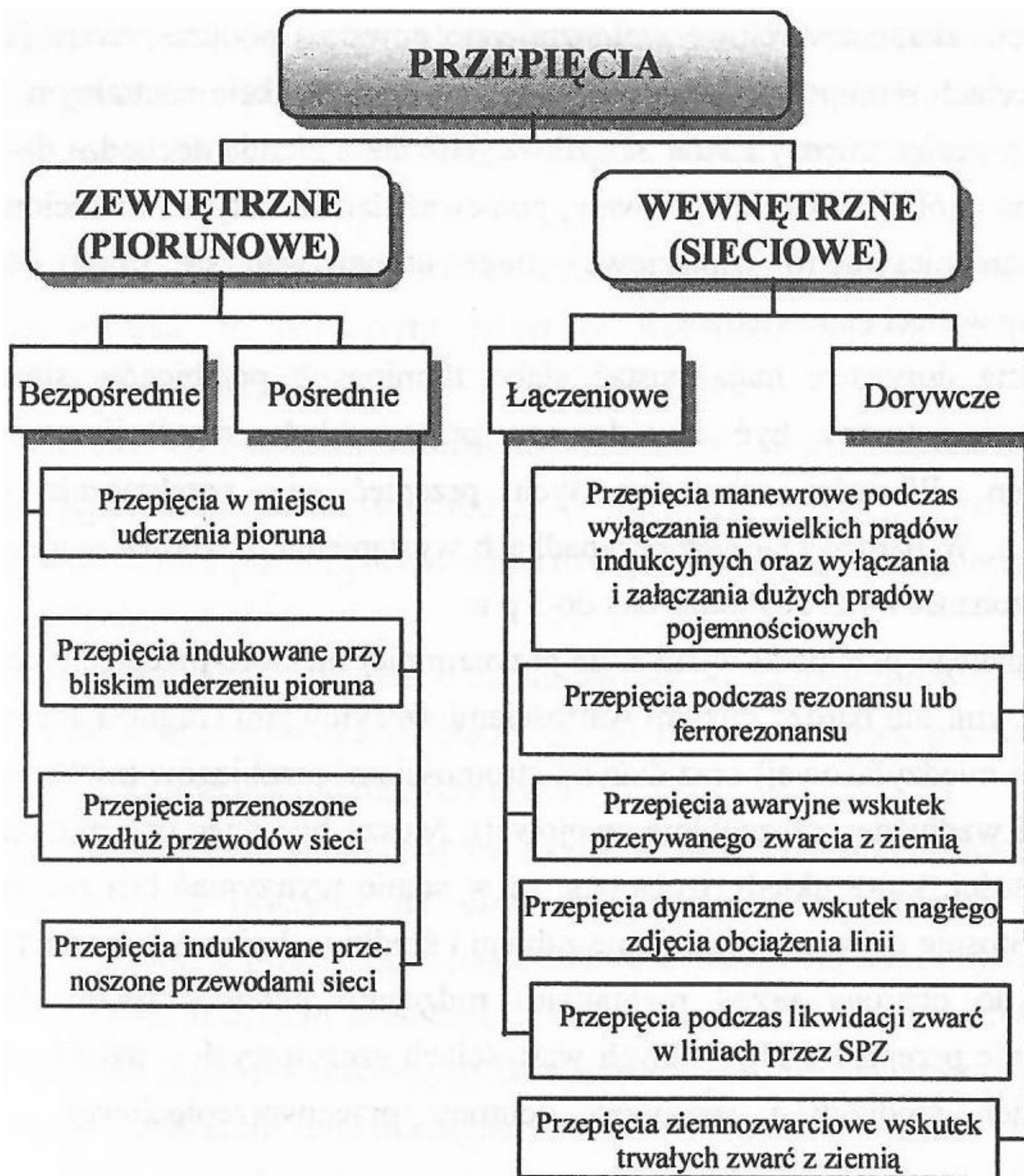
awaryjne przyczyna: przerywane zwarcie z ziemią

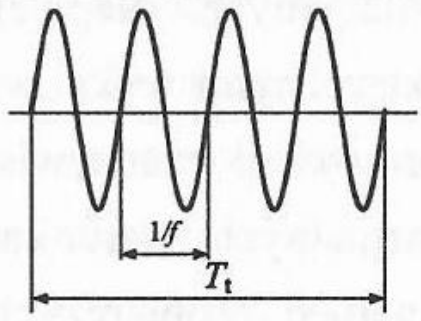
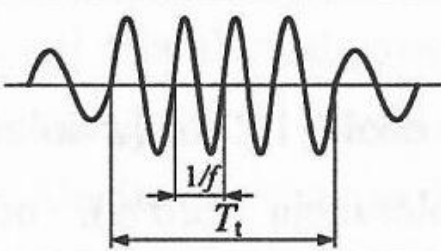
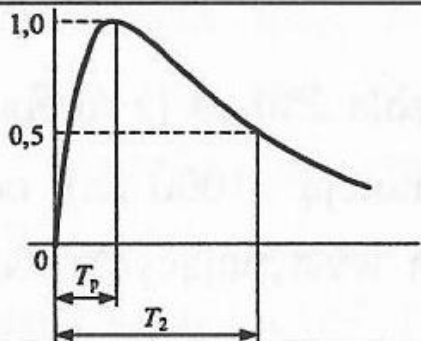
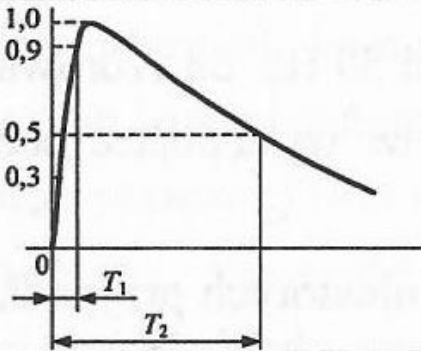
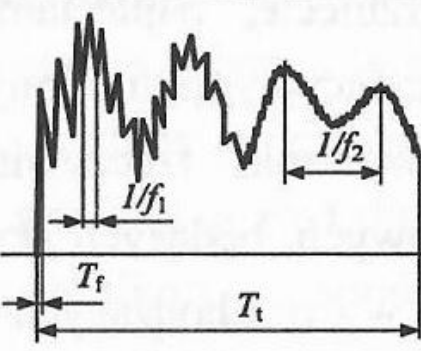
przebiegi zewnętrzne

piorunowe $k_p > 5$

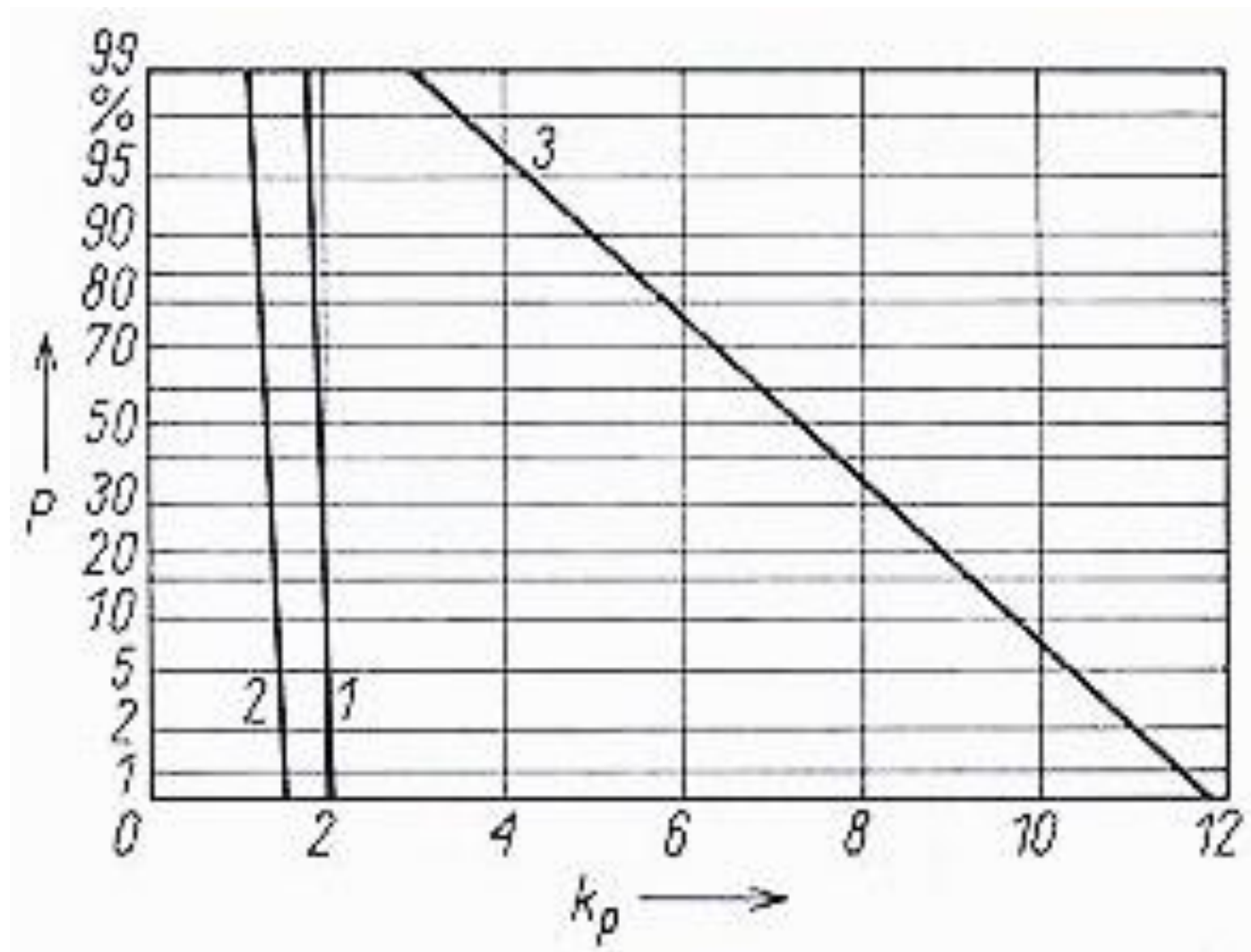
bezpośrednie przyczyna: uderzenie pioruna w urządzenie elektryczne (części czynne i konstrukcyjne)

indukowane przyczyna: uderzenie pioruna w pobliżu urządzenia elektrycznego



Napięcie lub przebieg	Kształt fali napięciowej (przebiegiowej)	Parametry opisujące kształt fali	Parametry znormalizowane
Napięcia pracy ciągłej małej częstotliwości		$f = 50 \text{ Hz}$ lub 60 Hz $T_t \geq 3600 \text{ s}$	$f = 50 \text{ Hz}$ lub 60 Hz
Przebiegi dorywcze małej częstotliwości		$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$	$48 \text{ Hz} < f < 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$
Przebiegi udarowe o łagodnym czole		$T_p > 20 \mu\text{s}$ $T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$
Przebiegi udarowe o stromym czole		$20 \mu\text{s} \geq T_1 \geq 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$
Przebiegi impulsowe (udarowe) o bardzo stromym czole		$100 \text{ ns} \geq T_f \geq 3 \text{ ns}$ $f_1 > 0,3 \text{ MHz}$ $f_1 < 100 \text{ MHz}$ $f_2 > 30 \text{ kHz}$ $f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_i \leq 3 \text{ ms}$	

Skumulowany rozkład prawdopodobieństwa wartości k_p

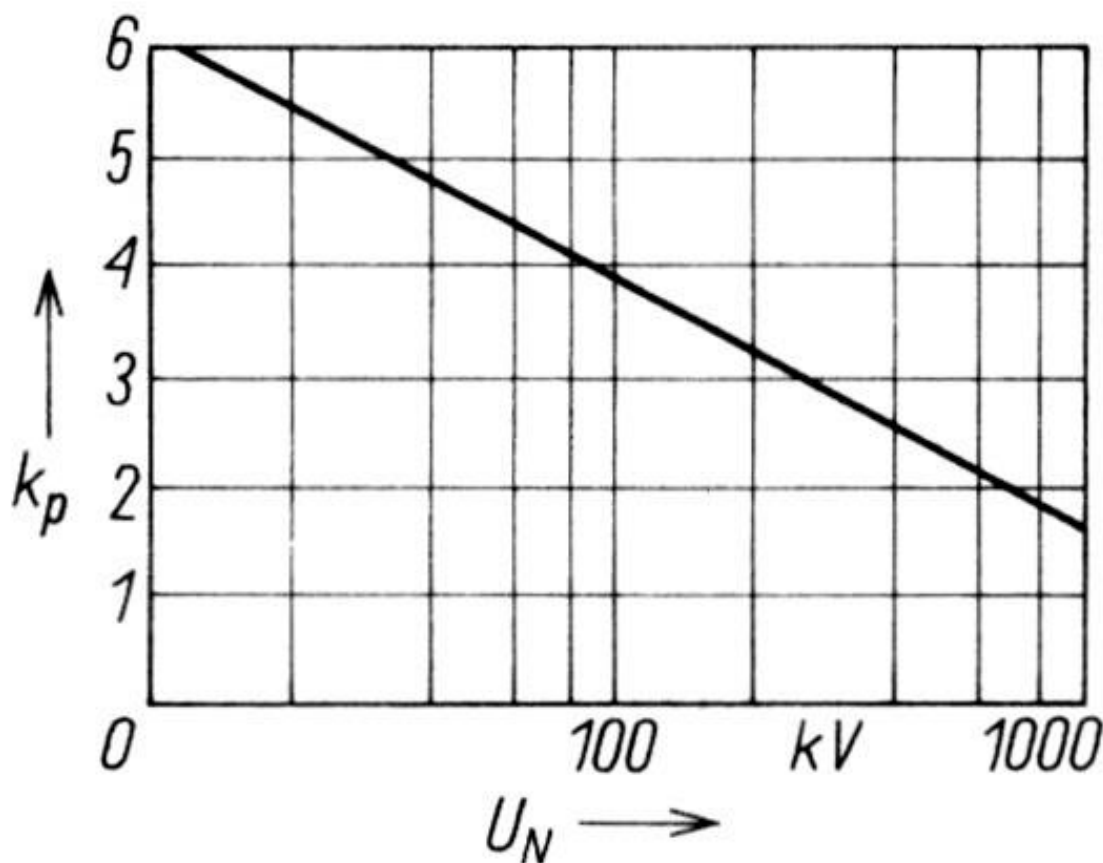


Dystrybuanty rozkładu prawdopodobieństwa wartości współczynnika przebieg k_p dla przebieg:

- 1 - łączeniowych w liniach 30 kV,
- 2 - łączeniowych w liniach 400 kV,
- 3 - piorunowych w liniach 30 kV.

Wytrzymałość izolacji urządzeń sieciowych na przepięcia wewnętrzne

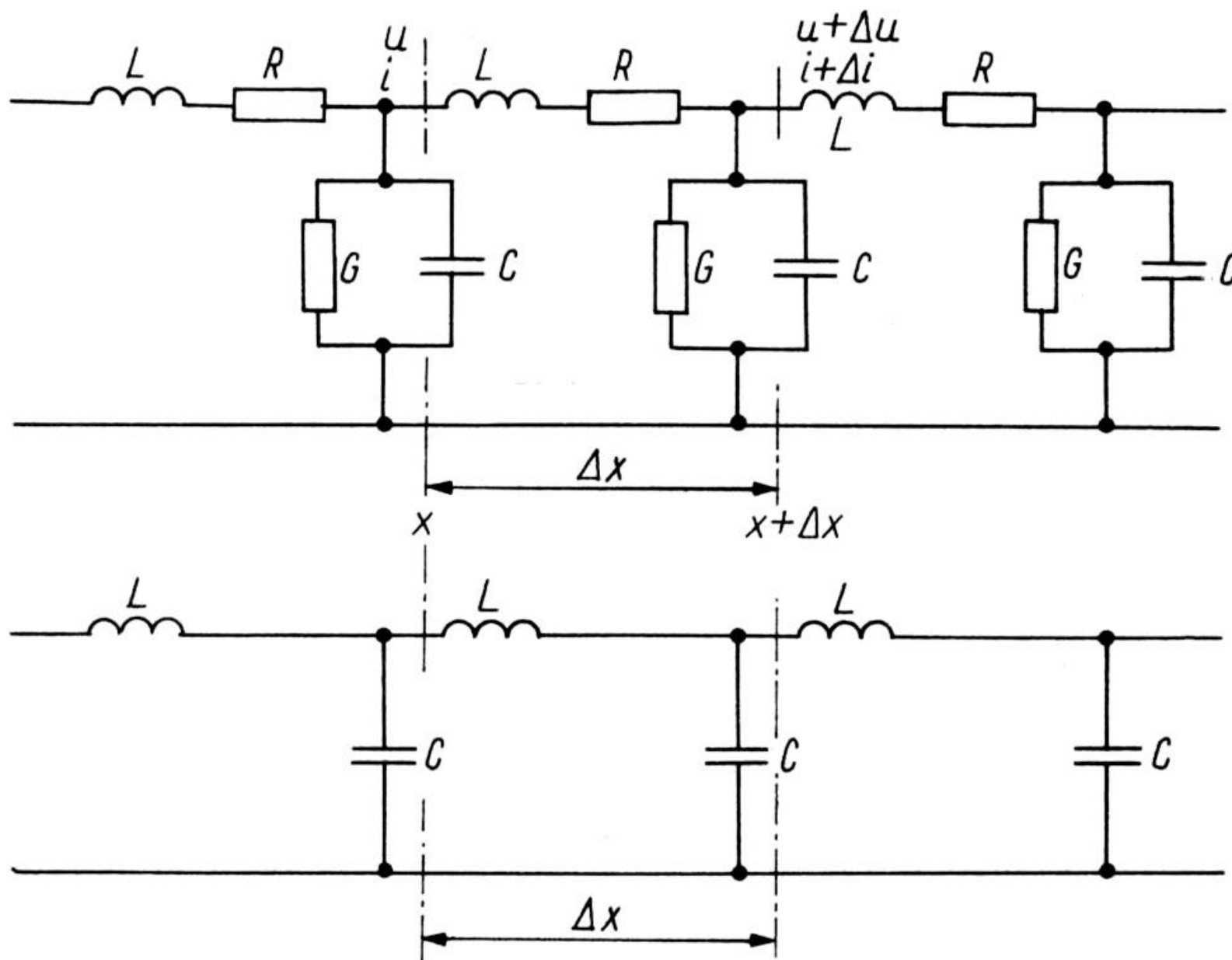
konieczność stosowania rozwiązań ograniczających przepięcia wewnętrzne ze względu na koszty układów izolacyjnych



Stosowana względna wytrzymałość izolacji doziemnej
przy przepięciach łączeniowych

Fale przepięciowe w liniach elektroenergetycznych

linia powinna być traktowana jako obiekt o stałych rozłożonych
w obliczeniach stałe rozłożone zastępuje się stałymi skupionymi
odniesionymi do jednostki długości linii



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:

$$L \frac{\partial i}{\partial t} \gg Ri$$

$$C \frac{\partial u}{\partial t} \gg Gu$$

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 :

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} = Lv = \frac{1}{Cv} \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \frac{c_0}{\sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}$$

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:

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

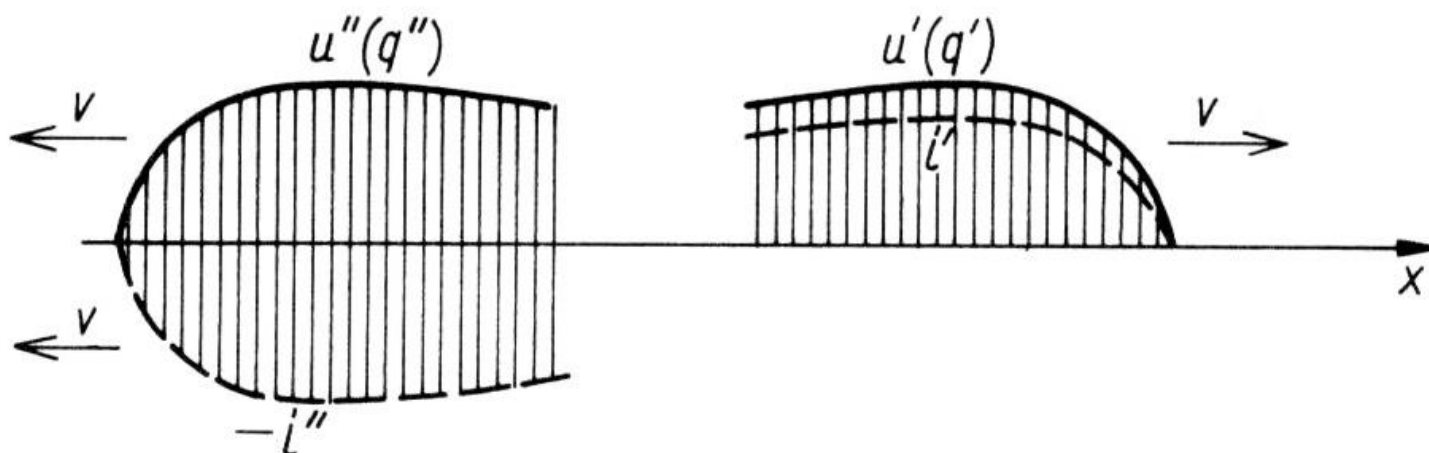
$$i''(x + vt)$$

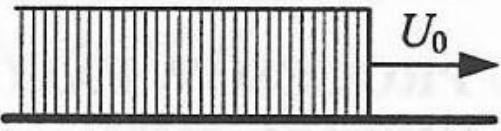
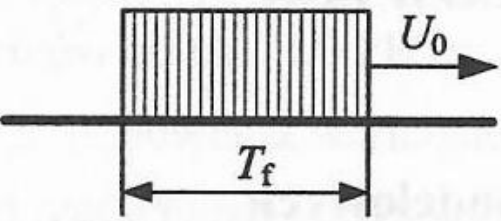
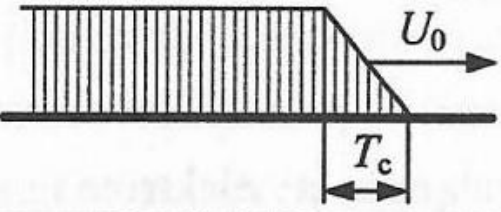
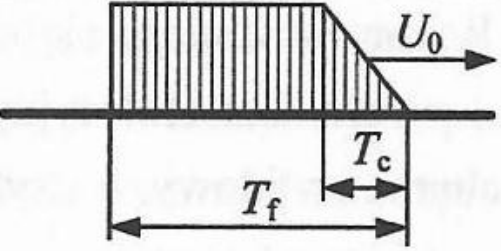
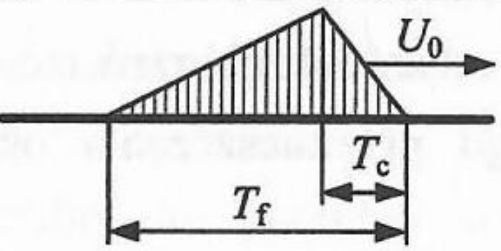
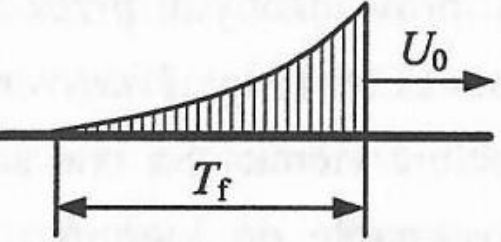
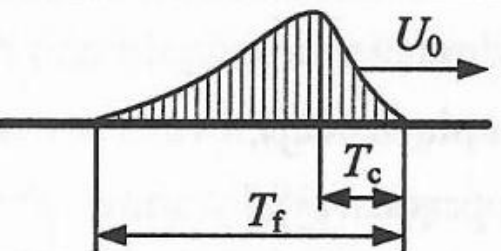
stosując zależności:

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

otrzymujemy:

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

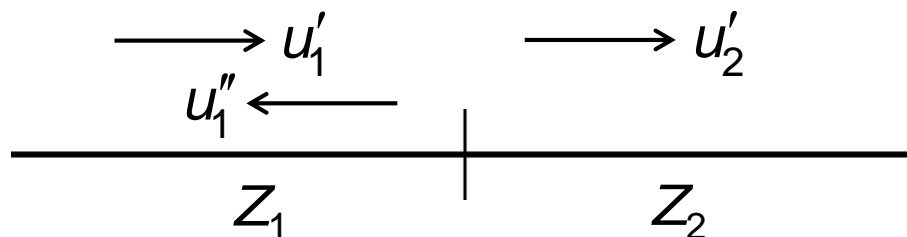


Szkiec	Uwagi
	Fala prostokątna „zasilana”
	Fala prostokątna „samotna” o czasie trwania T_f
	Fala „zasilana” o czole ukośnym i czasie trwania czoła T_c
	Fala „samotna” o czole ukośnym, czasie trwania T_f i czasie trwania czoła T_c
	
	Inne fale „samotne”
	

Przejście fali prostokątnej zasilanej przez węzeł łączący linie o różnych impedancjach falowych

$$u_1 = u'_1 + u''_1$$

$$i_1 = \frac{u'_1}{Z_1} - \frac{u''_1}{Z_1}$$



$$i'_1 = \frac{u'_1}{Z_1} \quad i''_1 = -\frac{u''_1}{Z_1} \quad i_1 = \frac{u_1}{Z_1}$$

$$i_1 = i'_1 + i''_1 \quad u_1 = u'_1 + u''_1$$

$$u'_2 = u_1 = u'_1 + u''_1$$

$$\frac{u'_2}{Z_2} = \frac{u'_1}{Z_1} - \frac{u''_1}{Z_1} = \frac{u'_1}{Z_1} - \frac{u_1 - u'_1}{Z_1} = \frac{2 \cdot u'_1}{Z_1} - \frac{u_1}{Z_1} = \frac{2 \cdot u'_1}{Z_1} - \frac{u'_2}{Z_1}$$

$$\frac{u'_2}{Z_2} = \frac{2 \cdot u'_1}{Z_1} - \frac{u'_2}{Z_1} \quad \frac{u'_2}{Z_2} + \frac{u'_2}{Z_1} = \frac{2 \cdot u'_1}{Z_1}$$

$$\frac{u'_2 \cdot Z_1}{Z_2 \cdot Z_1} + \frac{u'_2 \cdot Z_2}{Z_1 \cdot Z_2} = \frac{2 \cdot u'_1}{Z_1} \quad \frac{u'_2 \cdot (Z_1 + Z_2)}{Z_1 \cdot Z_2} = \frac{2 \cdot u'_1}{Z_1}$$

$$\frac{u'_2 \cdot (Z_1 + Z_2)}{Z_1 \cdot Z_2} = \frac{2 \cdot u'_1}{Z_1} \quad u'_2 = \frac{2 \cdot u'_1 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 \cdot (Z_1 + Z_2)} = \frac{2 \cdot u'_1 \cdot Z_2}{(Z_2 + Z_1)}$$

$$u'_2 = u_1 = u'_1 + u''_1$$

$$u_1 = u'_2 = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} \cdot u'_1 \quad \alpha_{pu(1-2)} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

$\alpha_{pu(1-2)}$ - współczynnik do obliczania sumy fal napięcia:
dochozącej do węzła i odbitej od niego (suma
ta jest równa fali przechodzącej przez węzeł)

$$i_1 = i'_2 = \frac{2}{Z_2 + Z_1} \cdot u'_1 = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot \frac{u'_1}{Z_1} = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_2 + Z_1} \cdot i'_1 \quad \alpha_{pi(1-2)} = \frac{2 \cdot Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$\alpha_{pi(1-2)}$ - współczynnik do obliczania sumy fal prądu:
dochozącej do węzła i odbitej od niego
(suma ta jest równa fali przechodzącej przez węzeł)

$$\frac{u_2'}{Z_2} = \frac{u_1}{Z_2} = \frac{u_1' + u_1''}{Z_2} = \frac{u_1'}{Z_1} - \frac{u_1''}{Z_1}$$

$$\frac{u_1'}{Z_2} + \frac{u_1''}{Z_2} = \frac{u_1'}{Z_1} - \frac{u_1''}{Z_1} \quad \frac{u_1''}{Z_2} + \frac{u_1''}{Z_1} = \frac{u_1'}{Z_1} - \frac{u_1'}{Z_2}$$

$$\frac{u_1'' \cdot Z_1}{Z_2 \cdot Z_1} + \frac{u_1'' \cdot Z_2}{Z_1 \cdot Z_2} = \frac{u_1' \cdot Z_2}{Z_1 \cdot Z_2} - \frac{u_1' \cdot Z_1}{Z_2 \cdot Z_1}$$

$$u_1'' \cdot (Z_1 + Z_2) = u_1' \cdot (Z_2 - Z_1)$$

$$u_1'' = u_1' \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \alpha_{ou(1-2)} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$\alpha_{ou(1-2)}$ - współczynnik do obliczania fali napięcia odbitej od węzła

$$i_1'' = -\frac{u_1''}{Z_1} = -\frac{u_1'}{Z_1} \cdot \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \alpha_{oi(1-2)} = -\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

$\alpha_{oi(1-2)}$ - współczynnik do obliczania fali prądu odbitej od węzła

Odbicie fali prostokątnej zasilanej od węzła sieci

$$u'_2 = u'_3 = u_1$$

$$u'_1 + u''_1 = u_1$$

$$i'_1 = \frac{u'_1}{Z_1} \quad i''_1 = -\frac{u''_1}{Z_1}$$

$$i'_2 = \frac{u_1}{Z_2} \quad i'_3 = \frac{u_1}{Z_3}$$

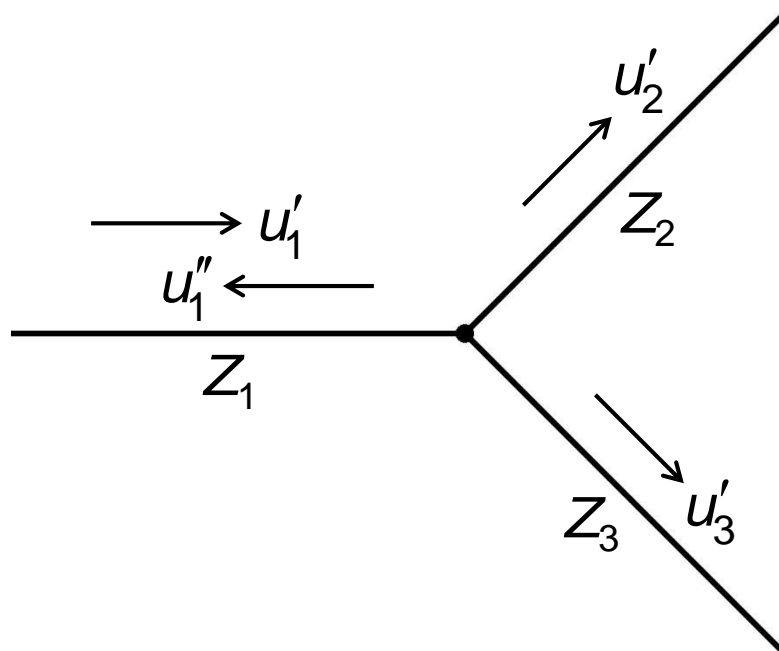
$$i'_1 + i''_1 = i'_2 + i'_3 \quad \frac{u'_1}{Z_1} - \frac{u''_1}{Z_1} = \frac{u_1}{Z_2} + \frac{u_1}{Z_3}$$

$$u''_1 = u_1 - u'_1$$

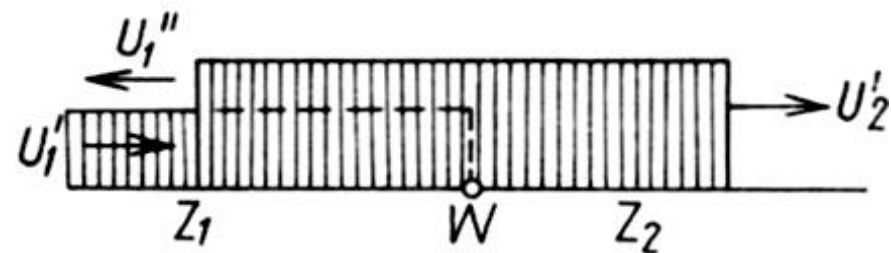
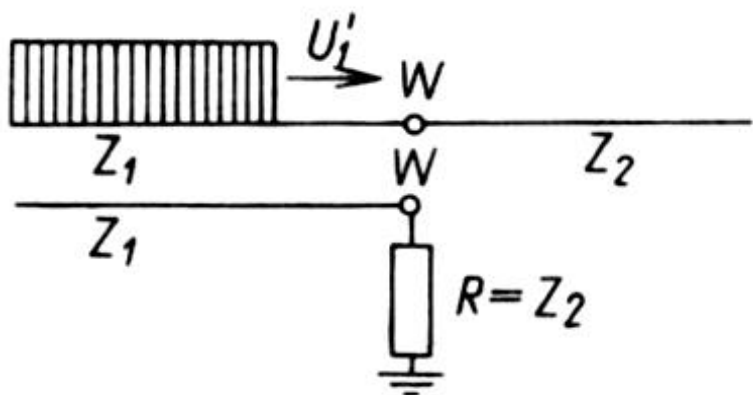
$$\frac{u'_1}{Z_1} - \frac{u_1 - u'_1}{Z_1} = \frac{u_1}{Z_2} + \frac{u_1}{Z_3} \quad \frac{u'_1}{Z_1} - \frac{-u'_1}{Z_1} - \frac{u_1}{Z_1} = \frac{u_1}{Z_2} + \frac{u_1}{Z_3}$$

$$\frac{2 \cdot u'_1}{Z_1} = u_1 \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \right)$$

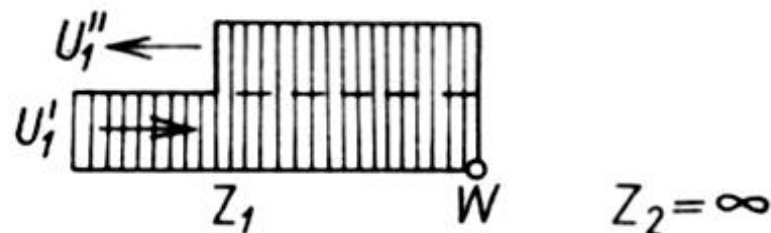
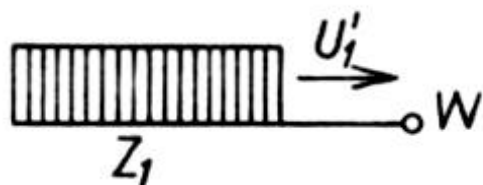
$$u_1 = \frac{2 \cdot \frac{u'_1}{Z_1}}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}}$$



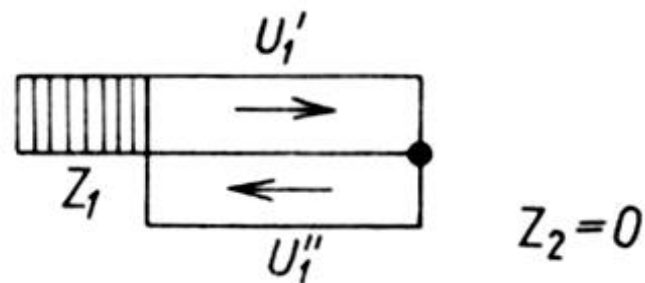
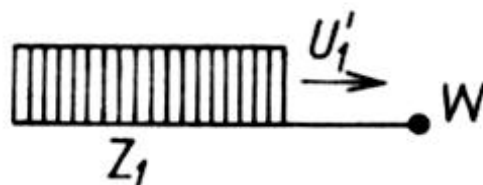
Przejście fali prostokątnej zasilanej przez węzeł sieci



$$\alpha_{pu(1-2)} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 \cdot R}{R + Z_1}$$



$$\alpha_{pu(1-2)} = 2$$



$$\alpha_{pu(1-2)} = 0$$

Tłumienie i zniekształcenie fal przepięciowych

Fale przepływające w linii są tłumione, co oznacza, że:

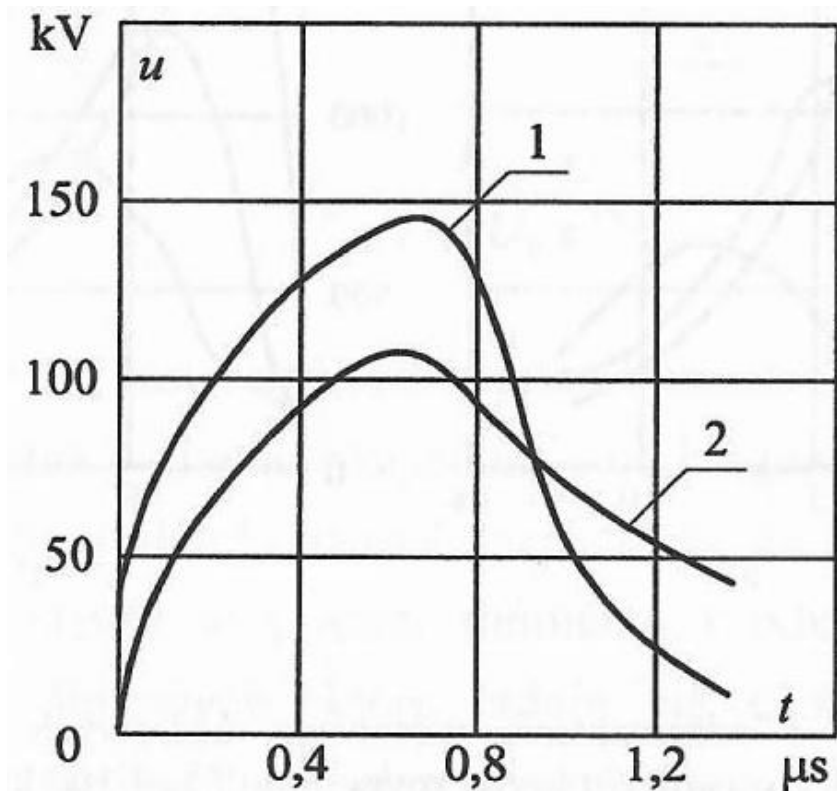
- ich wartości zmniejszają się,
- ich kształty zmieniają się.

Podstawowe rodzaje tłumienia:

- tłumienie rezystancyjne,
- tłumienie izolatorowe,
- tłumienie ulotowe.

Tłumienie rezystancyjne - zmniejszenie stromości czoła i amplitudy na skutek:

- strat energii w rezystancji przewodów i ziemi (straty energii w gruncie są zwykle znacznie większe niż w przewodach),
- zjawiska naskórkowości przy dużych stromościach przepięć (rezystancja przewodów i gruntu rośnie wraz ze wzrostem udziału wysokoczęstotliwościowych składowych przepięcia, po rozłożeniu go na szereg Fouriera).



Przykład tłumienia i odkształcania bardzo krótkiej fali napięciowej w układzie przewód-ziemia wskutek wpływu rezystywności gruntu $\rho = 1300 \Omega\text{m}$; 1 - przebieg fali w miejscu jej powstania, 2 - przebieg fali po przemieszczeniu się wzdłuż przewodu na odległość 1 km.

Większość strat następuje na rezystancji gruntu.

Na skutek zjawiska naskórkowości, prąd ziemnoprzewrotny przepływa przez niewielki przekrój przypowierzchniowej warstwy gruntu.

Tłumienie izolatorowe:

- ma charakter pojemnościowy,
- występuje na czole fali przepięciowej ładującej pojemność izolatora,
- powoduje zmianę kształtu fali (bez utraty energii, ponieważ ładunek fali jest przechowywany w pojemności izolatora, a następnie wraca do fali na jej grzbiecie, który wydłuża się).

Tłumienie ulotowe:

- strata energii przez odpływ ładunków z przewodów w wyniku wyładowania ulotowego,
- strata proporcjonalna do $(U_{pm} - U_j)^2$, tylko dla $U_{pm} > U_j$
- zmniejsza się wartość napięcia oraz prędkość czoła fali powyżej napięcia jonizacji (U_j),
- wartość szczytowa fali U_{pm} po przebyciu drogi x km zmniejsza się do wartości:

$$U_{pmX} = \frac{U_{pm0}}{kxU_{pm0} + 1}$$

gdzie: $k = (0,6 \text{ do } 6) \cdot 10^{-4}$ - współczynnik zależny od kształtu fali i biegunowości (dla biegunowości dodatniej jest dwa razy większy niż dla ujemnej, np. $k_+ = 4 \cdot 10^{-4}$, $k_- = 2 \cdot 10^{-4}$).

Przykład

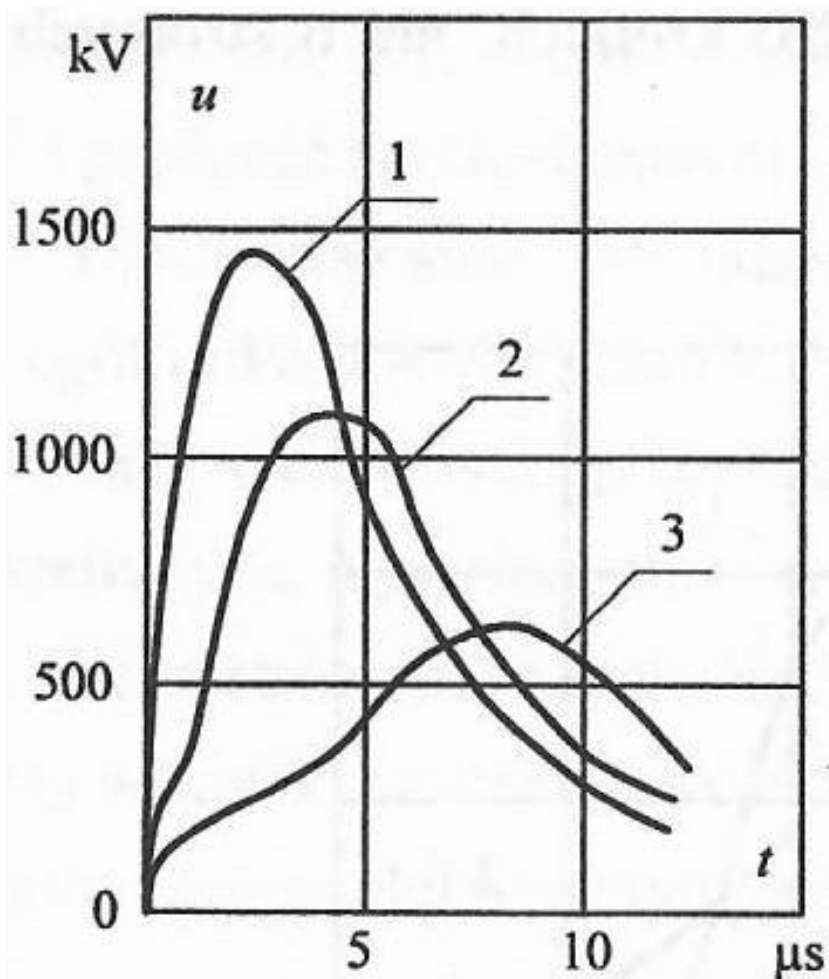
$$U_{pm0} = 3000 \text{ kV}, \quad x = 1 \text{ km}; \quad \rightarrow \quad U_{pmX} = 1364 \text{ kV}$$

Prędkość fali przepięciowej jest określona przez jednostkowe indukcyjności i pojemności linii:

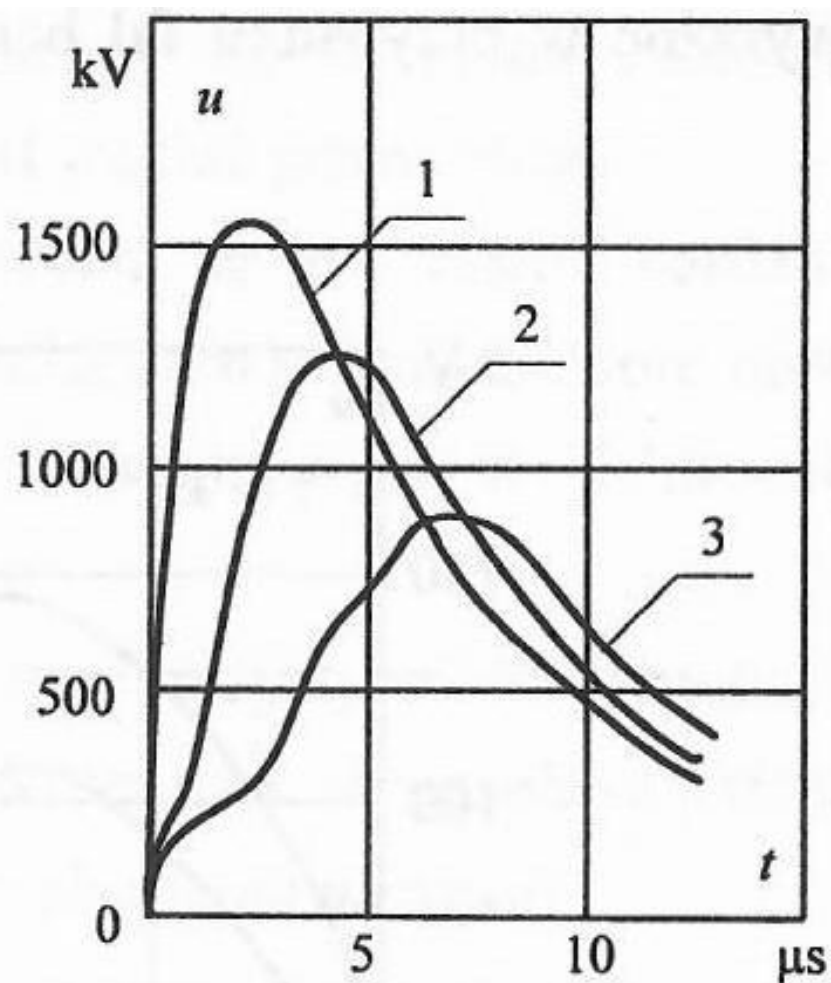
$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Wyładowanie ulotowe powoduje zwiększenie promienia przewodu (warstwa wokół przewodu zdominowana przez cząstki obdarzone ładunkami elektrycznymi).

Zwiększa się przez to pojemność poprzeczna linii, a tym samym maleje prędkość fal przepięciowych. 207



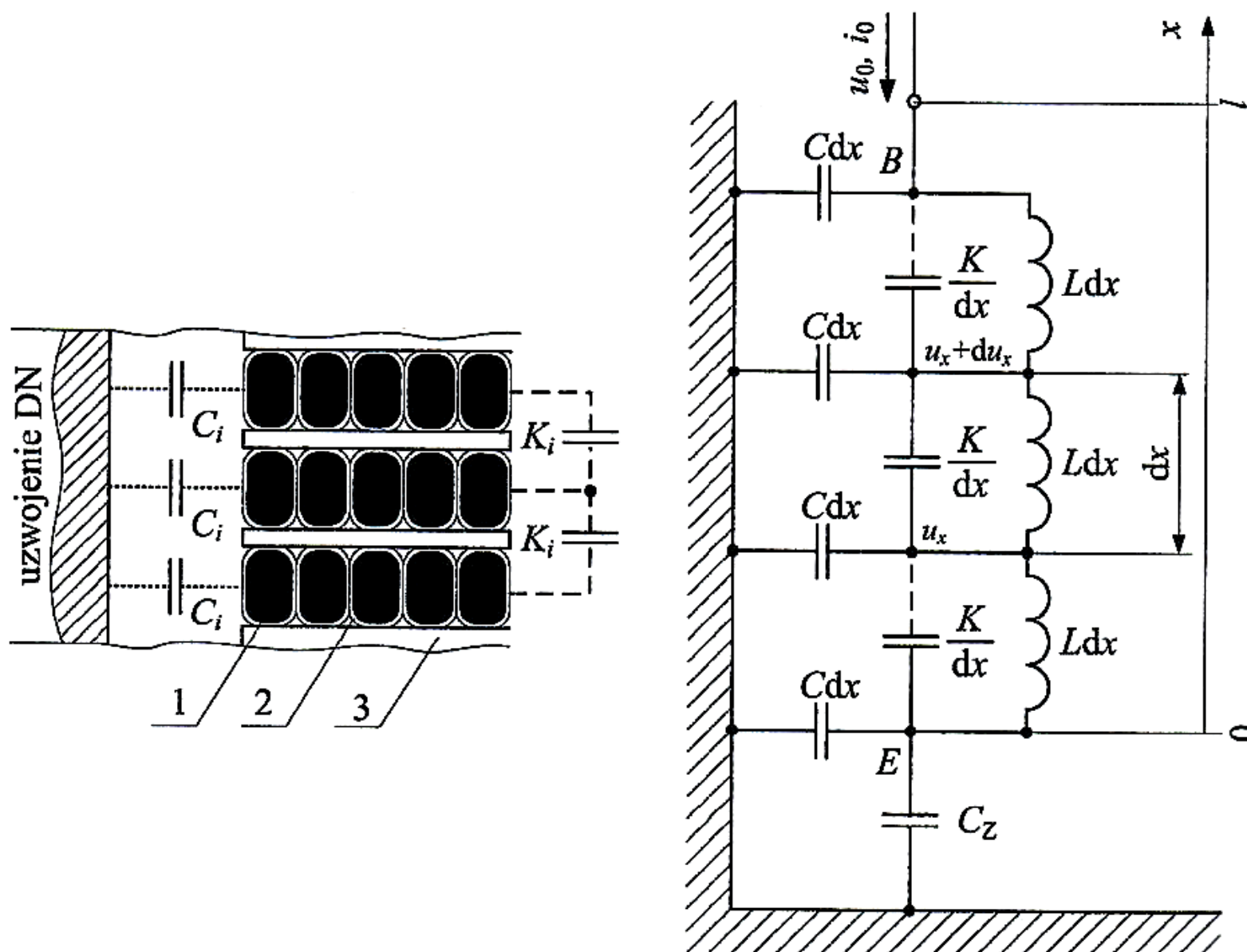
a)



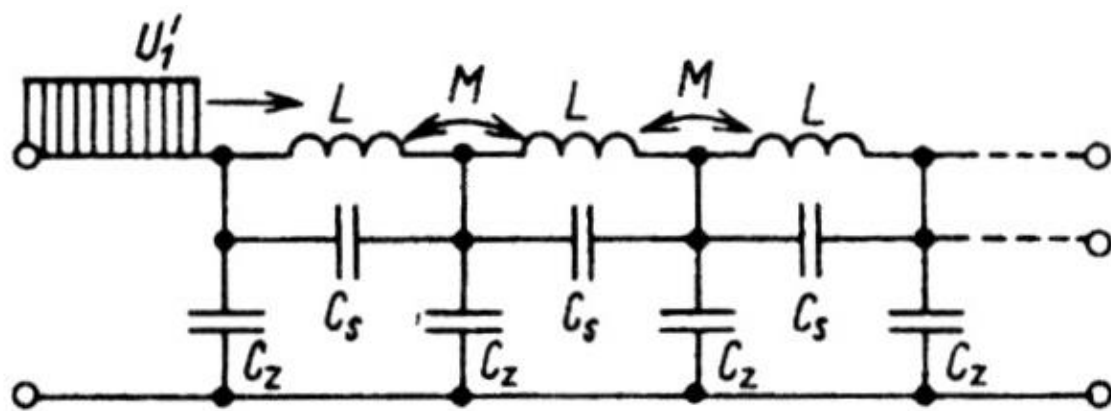
b)

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

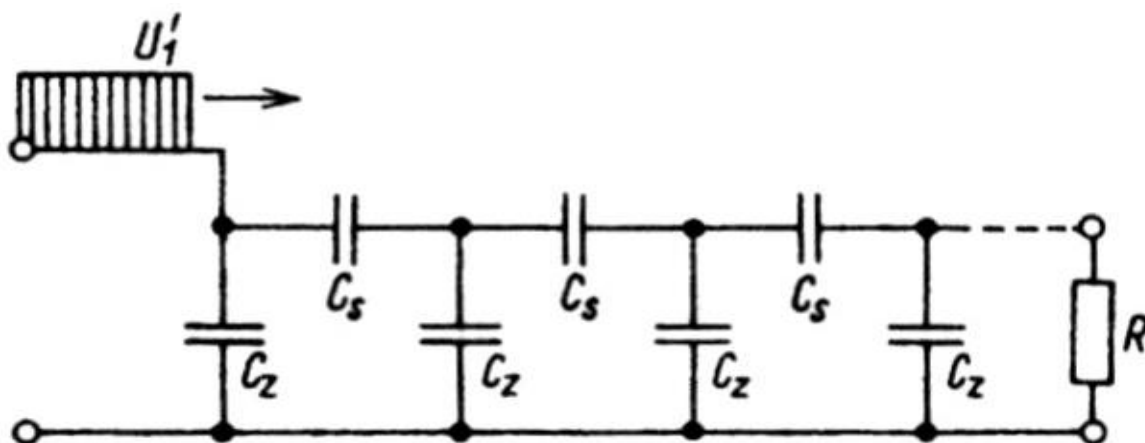


Szkic fragmentu cewkowego uzwojenia górnego napięcia transformatora oraz jego uproszczony schemat zastępczy; 1 - przewody nawojowe, 2 - oplot, 3 - przekładki międzycewkowe, C_i - pojemność doziemna cewki, C - jednostkowa pojemność doziemna, K_i - pojemność międzycewkowa, K - jednostkowa pojemność wzdłużna, L - jednostkowa indukcyjność własna uzwojenia, C_z - pojemność między końcem uzwojenia a ziemią, 209 B, E - początek i koniec uzwojenia

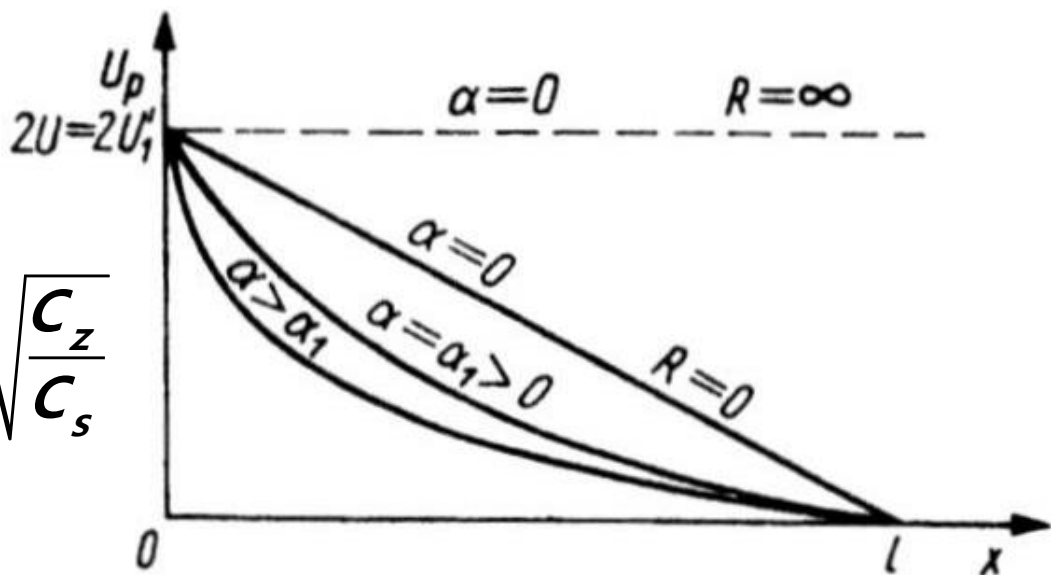


Schematy uzwojeń transformatora:

z uwzględnieniem sprzężeń międzycewkowych,

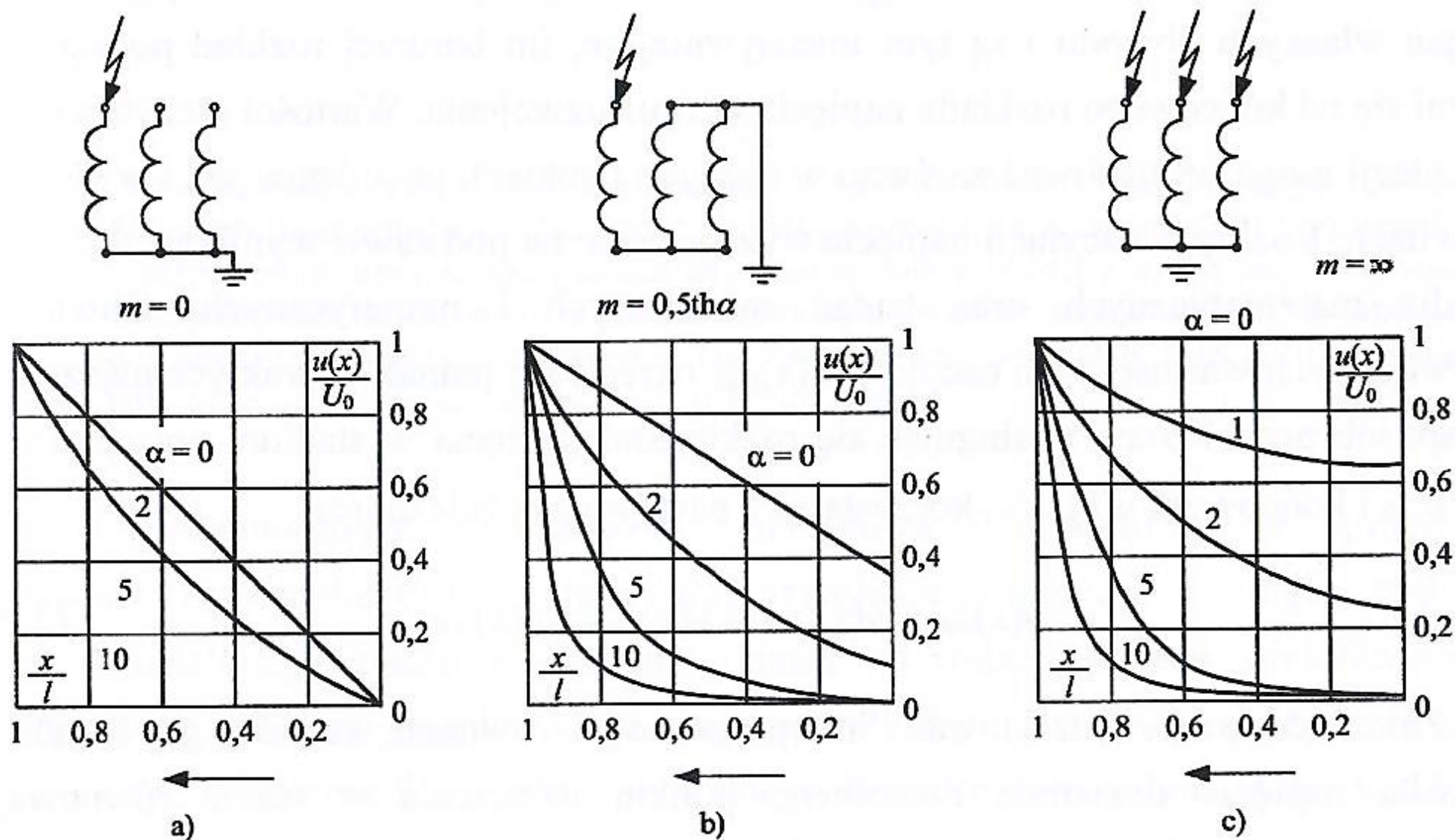


dla początkowego rozkładu napięcia.

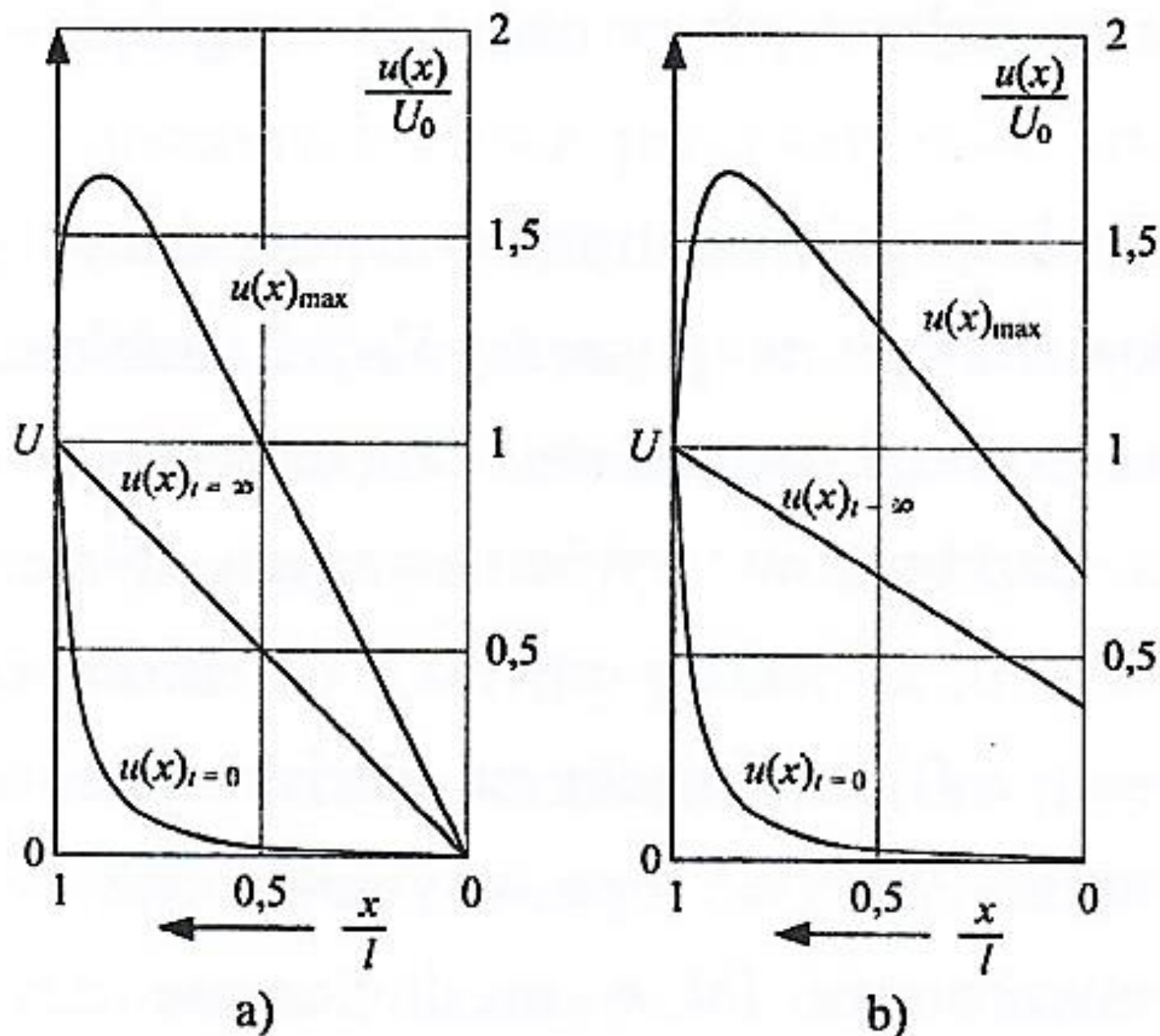


$$\alpha = l \sqrt{\frac{C_z}{C_s}}$$

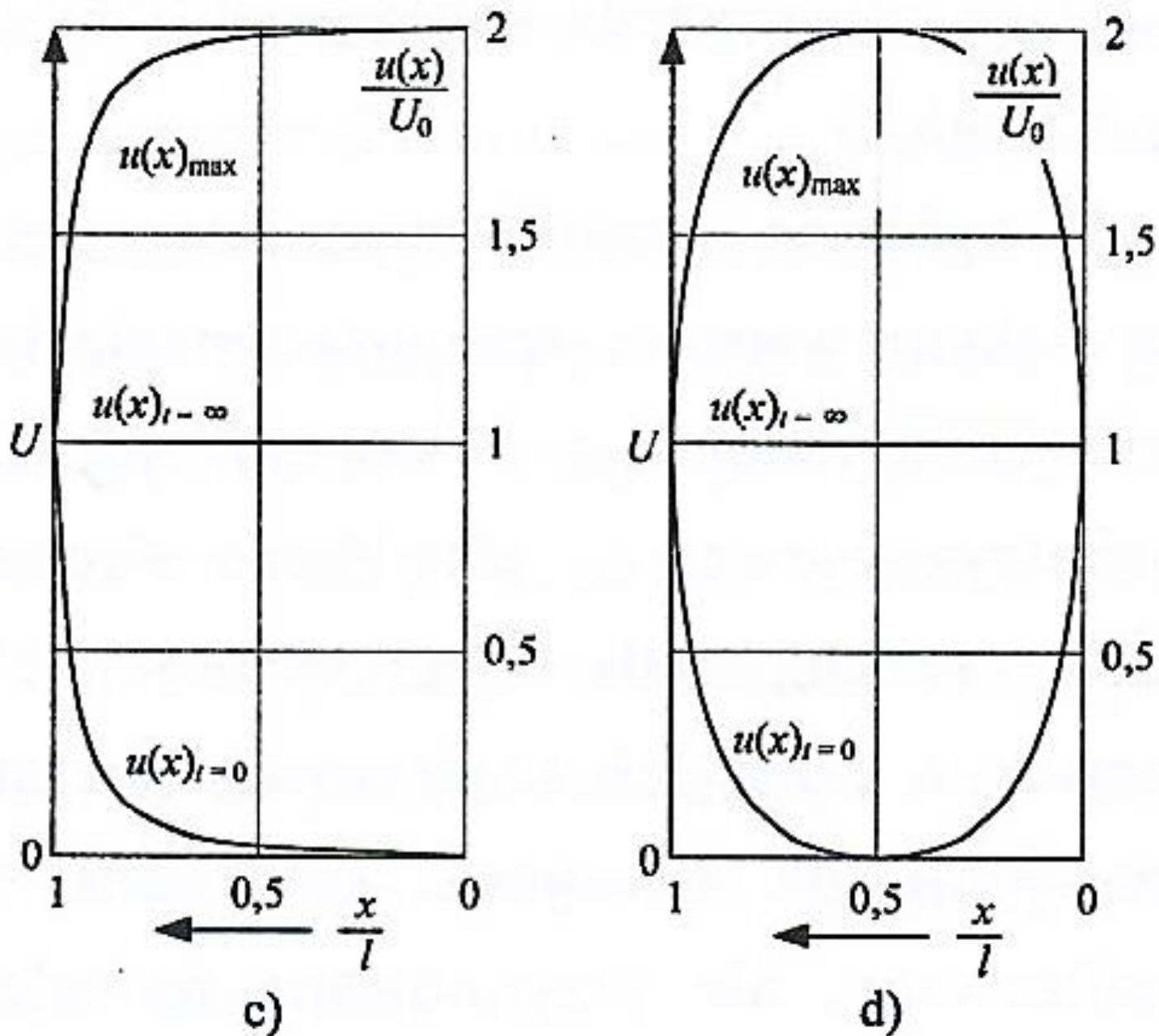
Początkowy rozkład napięcia.



Przykłady rozkładów napięcia wzdłuż uzwojeń fazowych GN transformatora w początkowym stadium stanu nieustalonego spowodowanego falami prostokątnymi zasilanymi o wartości U_0 : a) punkt neutralny uziemiony, fala w jednej z faz, b) punkt neutralny izolowany, uziemione dwa zaciski liniowe, c) punkt neutralny izolowany, fale jednocześnie w trzech fazach



Obwiednie największych oscylacji napięcia (wartości względne) wzdłuż uzwojeń fazowych transformatora o parametrze $\alpha = 10$: a) uzwojenia o bezpośrednio uziemionym punkcie neutralnym, fala w jednej z trzech faz, b) uzwojenia o bezpośrednio uziemionym punkcie neutralnym, fala w trzech fazach



Obwiednie największych oscylacji napięcia (wartości względne) wzdłuż uzwojeń fazowych transformatora o parametrze $\alpha = 10$: c) uzwojenia o izolowanym punkcie neutralnym, fale jednocześnie w trzech fazach, d) uzwojenia połączone w trójkąt, fale jednocześnie w trzech fazach

Sposoby zmniejszenia oscylacji napięcia w uzwojeniach

Zmniejszenie różnicy między początkowym i końcowym rozkładem napięcia z zastosowaniem rozwiązań zmniejszających wartość współczynnika α , takich jak:

- konstrukcyjne zwiększenie pojemności C_s ,
- zmniejszenie pojemności C_z (zastosowanie ekranów kompensujących),
- zmniejszenie stromości czoła i amplitudy przepięcia przez zastosowanie urządzeń ochronnych,
- wzmocnienie najbardziej naprężonej izolacji końców uzwojenia,
- uziemienie końca uzwojenia, jeśli to możliwe.