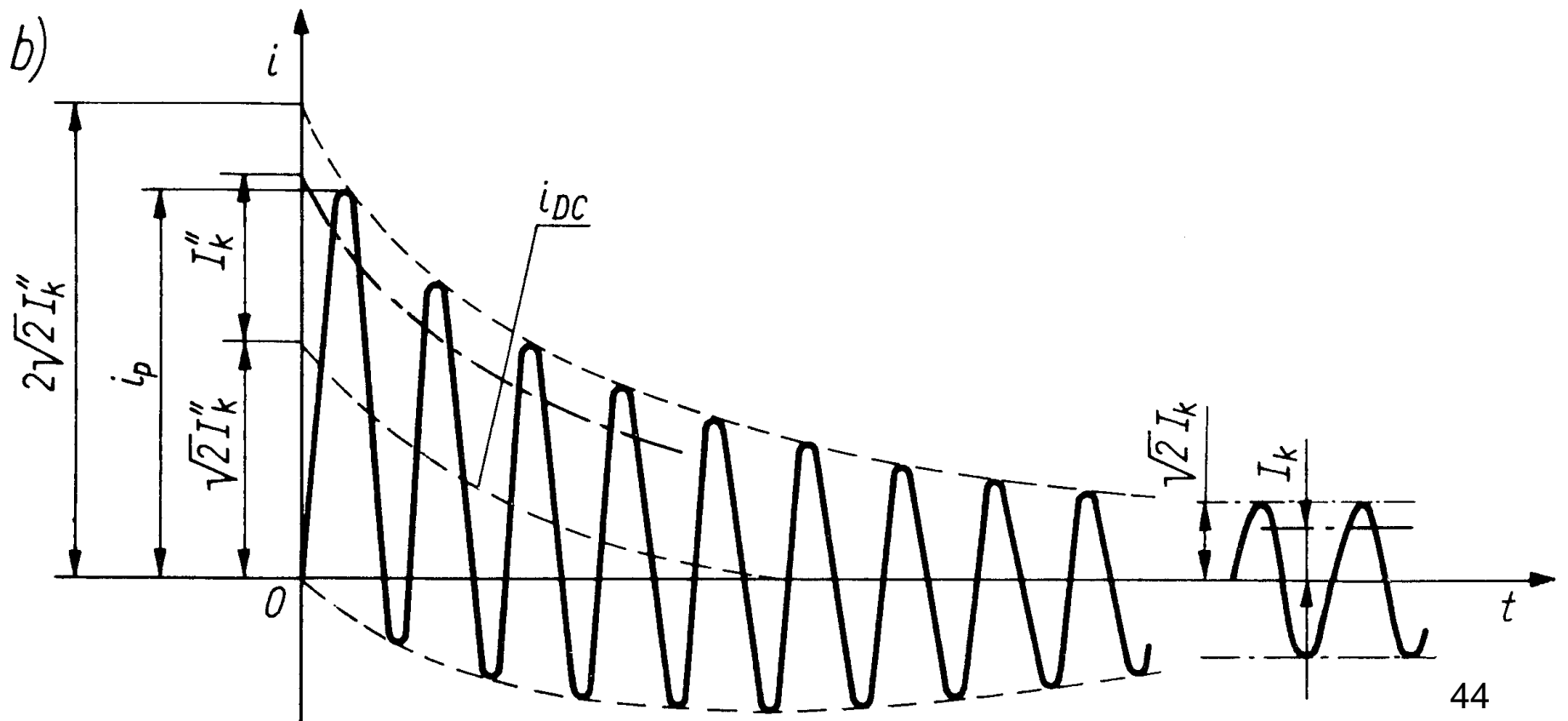
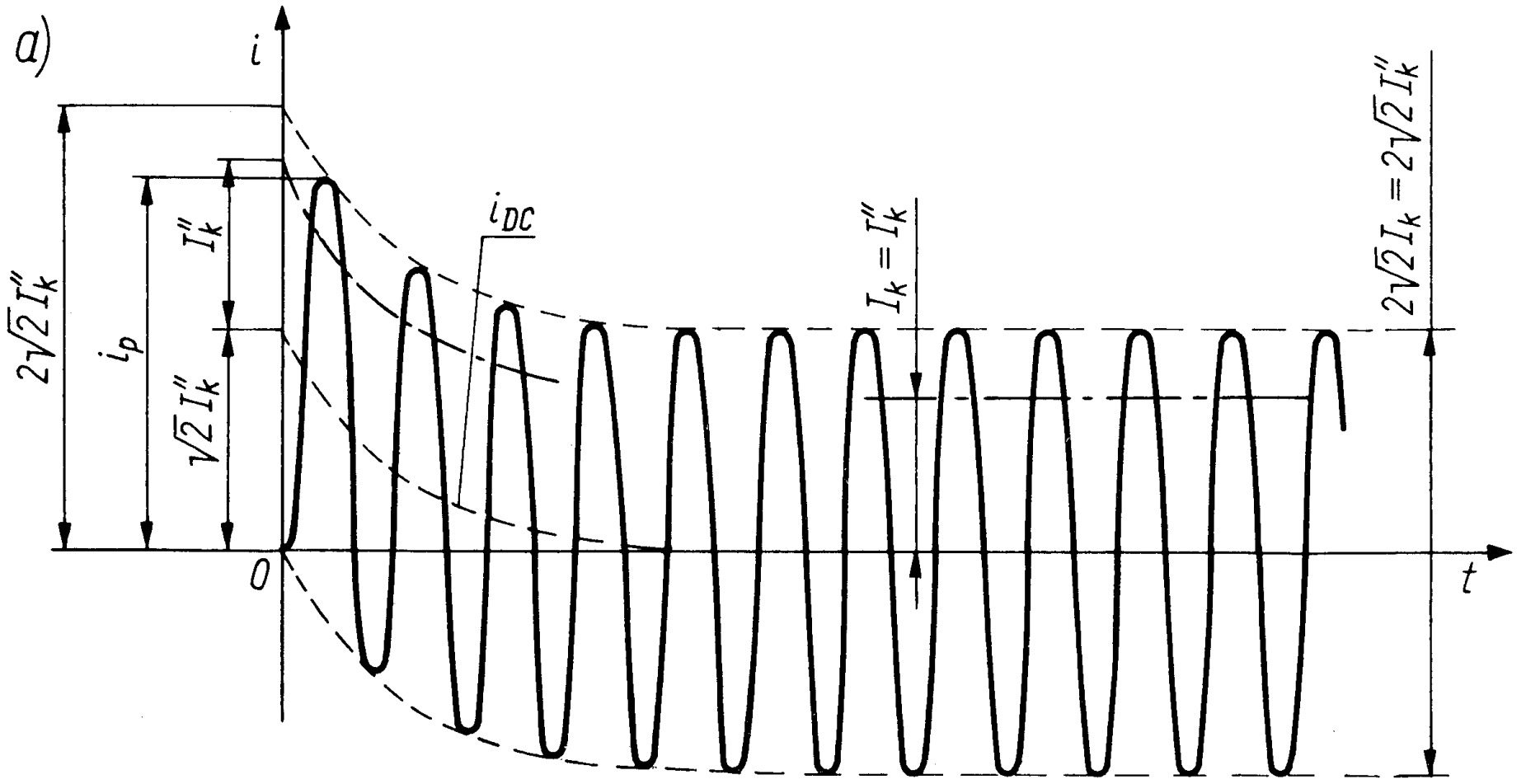


Metodyka obliczeń zwarciovych

Norma PN-EN 60909-0:2016 Prądy zwarciovowe w sieciach trójfazovych prądu przemiennego. Część 0: Obliczanie prądów

Rozróżnia się:

- zwarcie odległe, podczas którego składowa okresowa prądu zwarciovowego pozostaje stała - w czasie trwania zwarcia nie występują zmiany napięcia źródeł zasilania powodujących przepływ prądu zwarciovowego ani znaczące zmiany parametrów obwodu zwarciovowego;
- zwarcie pobliskie, podczas którego w co najmniej jednej maszynie synchronicznej prąd zwarciovowy początkowy jest dwukrotnie większy od prądu znamionowego tej maszyny lub udział silników asynchronicznych w prądzie zwarciovowym początkowym liczonym bez tych silników jest większy niż 5 % tego prądu.



Założenia upraszczające:

- rozpatruje się zwarcie pojedyncze, jednoczesne,
- podczas zwarcia nie występują zmiany w rozważanej sieci,
- pomija się wszystkie pojemności i upływności linii oraz admitancje równoległe reprezentujące niewirujące obciążenia z wyjątkiem pojemności linii dla składowej zerowej w sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym,
- przyjmuje się zerowe położenie przełączników zaczepek transformatorów,
- pomija się stany przejściowe w generatorach i silnikach,
- pomija się rezystancję łuku.

Obliczając prądy zwarciovowe w sieci wielonapięciowej należy przeliczać impedancje z jednego poziomu napięcia na inny, zwykle na poziom napięcia w miejscu zwarcia.

Źródło napięciowe zastępcze $cU_n/\sqrt{3}$ - źródło napięciowe idealne przyłączone w miejscu zwarcia, w schemacie dla składowej symetrycznej zgodnej, pozwalające obliczyć prąd zwarciaowy.

Napięcie znamionowe U_n	Wartości współczynnika napięciowego c	
	maksymalnego c_{\max}	minimalnego c_{\min}
Niskie, do 1000 V - 230/240 V - inne napięcie	1,00 1,05	0,95 1,00
Wysokie, ponad 1 kV	1,10	1,00

Oblicza się dwa prądy zwarciaowe:

- prąd zwarciaowy maksymalny, dla doboru urządzeń elektrycznych;
- prąd zwarciaowy minimalny, dla doboru bezpieczników i nastaw zabezpieczeń oraz dla sprawdzenia warunków rozruchu silników.

Maksymalny prąd zwarciovowy

Dla wyznaczenia maksymalnego prądu zwarciovowego należy:

- przyjąć współczynnik c dla maksymalnego prądu zwarciovowego,
- wybrać konfigurację systemu, dla której prądy zwarciovowe mają wartości maksymalne,
- uwzględnić silniki asynchroniczne,
- rezystancje linii przyjąć w temperaturze 20°C .

Minimalny prąd zwarciovowy

Dla wyznaczenia minimalnego prądu zwarciovowego należy:

- przyjąć współczynnik c dla minimalnego prądu zwarciovowego,
- wybrać konfiguracją systemu, dla której prądy zwarciovowe mają wartości minimalne,
- pominąć silniki,
- rezystancje linii przeliczyć na maksymalną temperaturę zgodnie ze wzorem:

$$R_L = [1 + \alpha(T_k - 20)] R_{L20}$$

R_{L20} – rezystancja linii w temperaturze 20 °C

T_k – temperatura przewodu linii na koniec trwania zwarcia [°C]

$\alpha = 0,004 \text{ K}^{-1}$ (dla większości materiałów przewodowych)

Temperaturę przewodu linii na koniec trwania zwarcia można określić w oparciu o normę PN-EN 60865 Obliczanie skutków prądów zwarciovych, Część 1: Definicje i metody obliczania

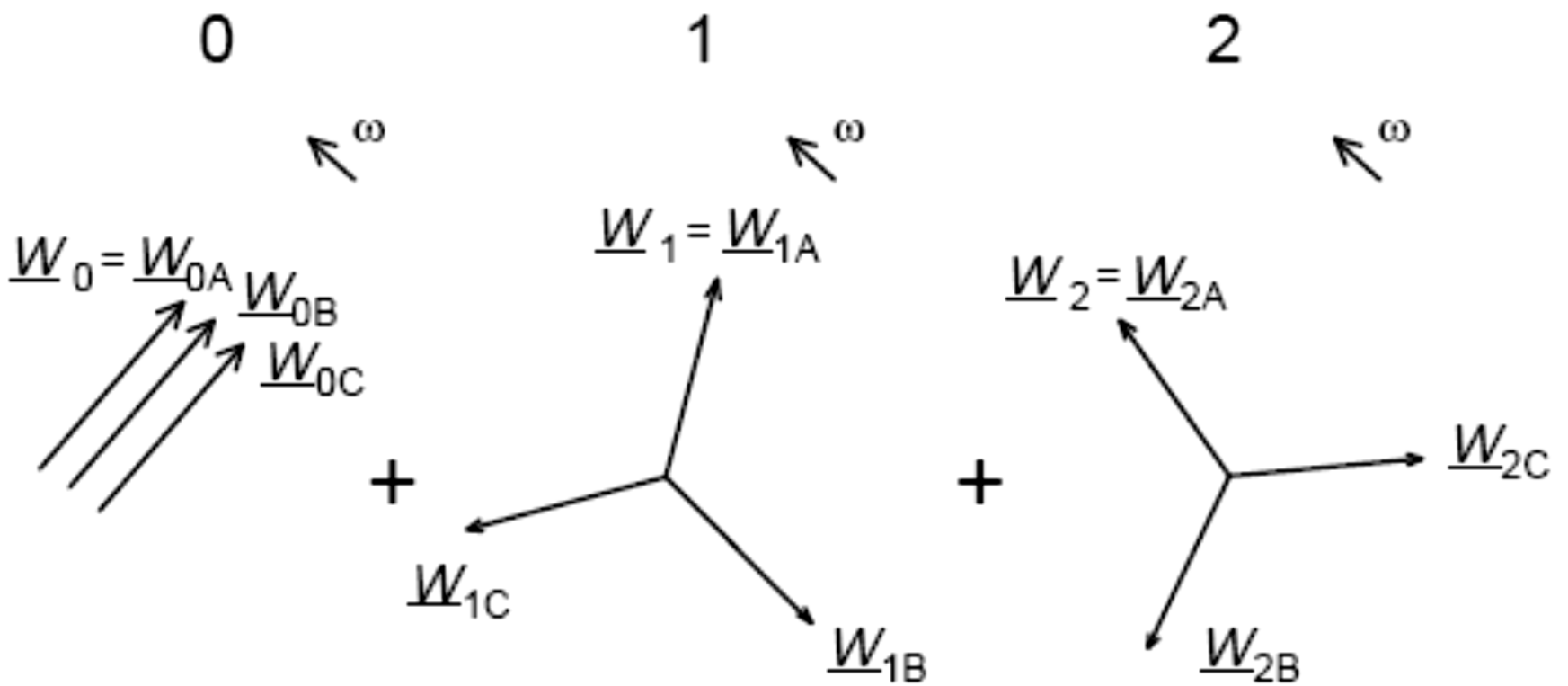
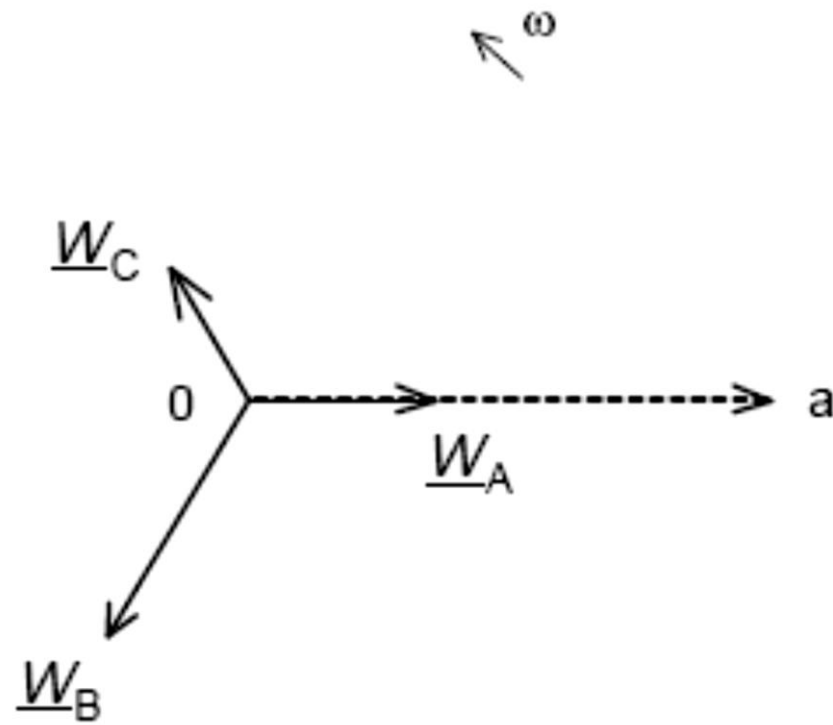
Metoda składowych symetrycznych (znana również jako przekształcenie Fortescoué) – metoda analizy elektroenergetycznych układów trójfazowych za pomocą wektorów o zgodnej, odwrotnej i zerowej kolejności faz.

Metoda składowych symetrycznych ułatwia, względem klasycznej metody, analizę układów w stanach awaryjnych (zwarcia międzyfazowe i doziemne, przerwy).

Idea metody składowych symetrycznych polega na tym, że stosując odpowiednie przekształcenie liniowe, zastępujemy układ trzech wektorów niesymetrycznych przez trzy równoważne układy symetryczne.

W rezultacie niesymetryczne źródło zasilania zastępujemy trzema symetrycznymi źródłami i stosując zasadę superpozycji, dokonujemy obliczenia rozptywu prądów dla każdego układu symetrycznego napięć.

Następnie nakładamy obliczone prądy wywołane działaniem każdego źródła niezależnie i otrzymujemy rozptyw wypadkowy. Rozkład układu niesymetrycznego może również dotyczyć prądów lub napięć na odbiorniku.



Macierze napięć i prądów w układzie osi fazowych (A,B,C) i osi składowych symetrycznych (0,1,2):

$$\mathbf{U}_{ABC} = \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{ABC} = \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix}, \quad \mathbf{U}_{012} = \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I}_{012} = \begin{bmatrix} \underline{I}_0 \\ \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \end{bmatrix}$$

Macierz transformacji:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}, \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Macierz odwrotna:

$$\mathbf{S}^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{ABC} &= \mathbf{S}\mathbf{I}_{012} & \text{oraz} & & \mathbf{I}_{012} &= \mathbf{S}^{-1}\mathbf{I}_{ABC} \\ \mathbf{U}_{ABC} &= \mathbf{S}\mathbf{U}_{012} & & & \mathbf{U}_{012} &= \mathbf{S}^{-1}\mathbf{U}_{ABC} \end{aligned}$$

Prawo Ohma zapisane w postaci macierzowej przyjmuje postać:

$$\mathbf{U}_{ABC} = \mathbf{Z}_{ABC}\mathbf{I}_{ABC}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{AA} & \underline{Z}_{AB} & \underline{Z}_{AC} \\ \underline{Z}_{BA} & \underline{Z}_{BB} & \underline{Z}_{BC} \\ \underline{Z}_{CA} & \underline{Z}_{CB} & \underline{Z}_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix}$$

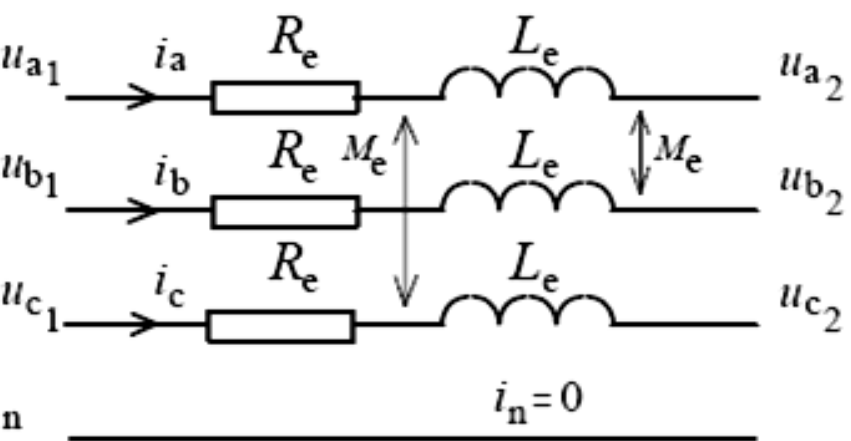
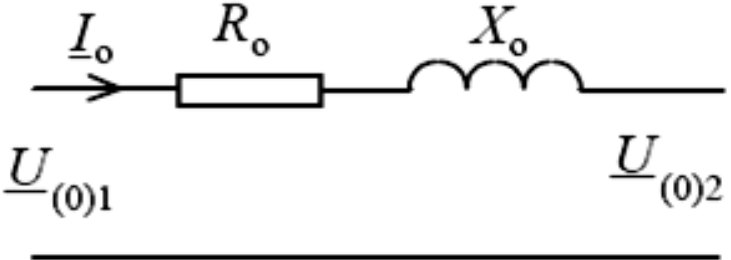
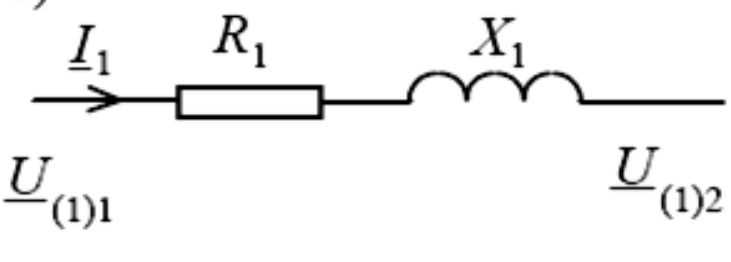
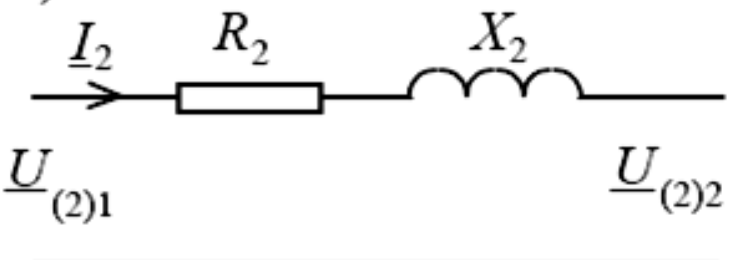
Diagonalizacja macierzy \mathbf{Z} :

$$\mathbf{S}\mathbf{U}_{012} = \mathbf{Z}_{ABC}\mathbf{S}\mathbf{I}_{012}$$

$$\mathbf{U}_{012} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{Z}_{ABC}\mathbf{S}\mathbf{I}_{012}$$

$$\mathbf{Z}_{012} = \mathbf{S}^{-1}\mathbf{Z}_{ABC}\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_2 \end{bmatrix}$$

Schematy zastępcze elementu dla składowych fazowych i symetrycznych.

Składowe fazowe A, B, C	Składowe symetryczne 0,1,2
 <p>Diagram showing the equivalent circuit for phase components A, B, and C. It consists of three parallel branches representing phases a, b, and c. Each branch contains a series combination of a resistor R_e and an inductor L_e. The input voltages are u_{a1}, u_{b1}, and u_{c1}, and the output voltages are u_{a2}, u_{b2}, and u_{c2}. The currents are i_a, i_b, and i_c. Mutual inductances M_e are indicated between the inductors. A neutral line 'n' is shown at the bottom with current $i_n = 0$.</p>	<p>0)</p>  <p>1)</p>  <p>2)</p>  <p>Diagram showing the equivalent circuits for the symmetrical components 0, 1, and 2. Each circuit is a series combination of a resistor and an inductor. The input current is I_0, I_1, and I_2 respectively, and the output voltage is $U_{(0)2}$, $U_{(1)2}$, and $U_{(2)2}$ respectively. The input voltage is $U_{(0)1}$, $U_{(1)1}$, and $U_{(2)1}$ respectively.</p>

Zależności na napięcia i prądy po przekształceniu:

$$\underline{\mathbf{U}}_{012} = \mathbf{S}^{-1}\underline{\mathbf{U}}_{ABC}$$

lub

$$\underline{U}_0 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)$$

$$\underline{U}_1 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a\underline{U}_B + a^2\underline{U}_C)$$

$$\underline{U}_2 = \frac{1}{3}(\underline{U}_A + a^2\underline{U}_B + a\underline{U}_C)$$

$$\underline{\mathbf{I}}_{012} = \mathbf{S}^{-1}\underline{\mathbf{I}}_{ABC}$$

lub

$$\underline{I}_0 = \frac{1}{3}(I_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C)$$

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{3}(I_A + a\underline{I}_B + a^2 I_C)$$

$$I_2 = \frac{1}{3}(\underline{I}_A + a^2 \underline{I}_B + a I_C)$$

Wzory transformujące napięcia oraz prądy z układu 0, 1, 2 do układu A, B, C:

$$\mathbf{U}_{ABC} = \mathbf{S}\mathbf{U}_{012}$$

lub

$$\underline{U}_A = \underline{U}_0 + \underline{U}_1 + \underline{U}_2$$

$$\underline{U}_B = \underline{U}_0 + a^2 \underline{U}_1 + a \underline{U}_2$$

$$\underline{U}_C = \underline{U}_0 + a \underline{U}_1 + a^2 \underline{U}_2$$

$$\mathbf{I}_{ABC} = \mathbf{S}\mathbf{I}_{012}$$

lub

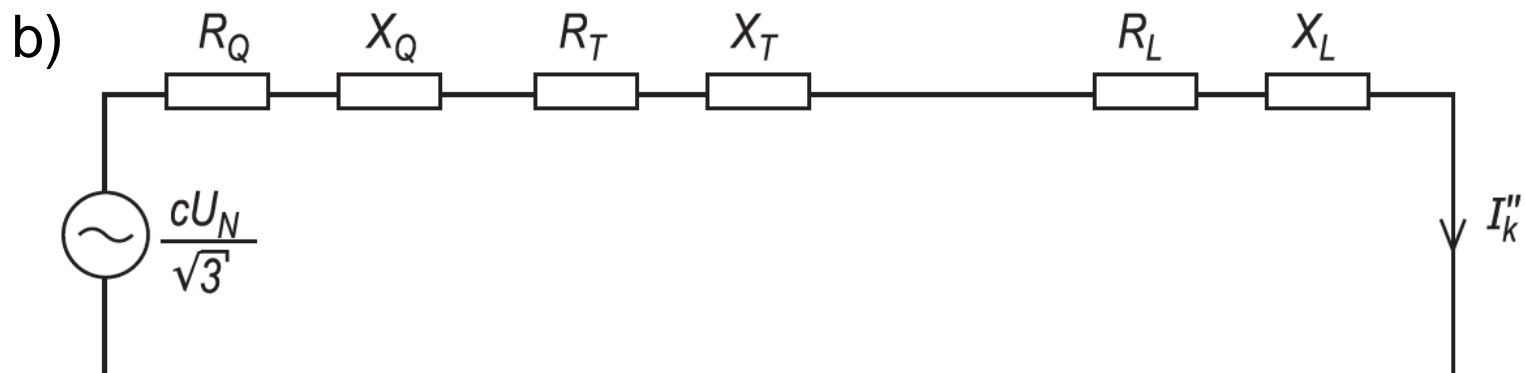
$$\underline{I}_A = \underline{I}_0 + \underline{I}_1 + \underline{I}_2$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_0 + a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_0 + a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2$$

Zwarcia odległe od generatorów

W obliczeniach praktycznych za zwarcie odległe od generatorów uznaje się zwarcie zasilane przez transformator, którego reaktancja (impedancja) jest co najmniej dwukrotnie większa od impedancji źródła zasilania.



a) uproszczony schemat systemu elektroenergetycznego,

b) schemat zastępczy dla jednej fazy przy zwarciu trójfazowym symetrycznym,

Q – zastępcze źródło zasilania o mocy zwarciowej S_k'' ,

T – transformator, L – linia elektroenergetyczna

Prąd zwarciový początkowy I_k'' przy zwarciu trójfazowym zasilanym z pojedynczego źródła oblicza się według wzoru:

$$I_k'' = \frac{cU_N}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

w którym:

c – współczynnik napięciowy równy stosunkowi napięcia, jakie może występować w miejscu zwarcia przed pojawieniem się zwarcia, do napięcia znamionowego U_N ;

Z_k – impedancja zwarciová zgodna w miejscu zwarcia;

R_k – suma rezystancji zgodnych elementów obwodu zwarciovego połączonych szeregowo;

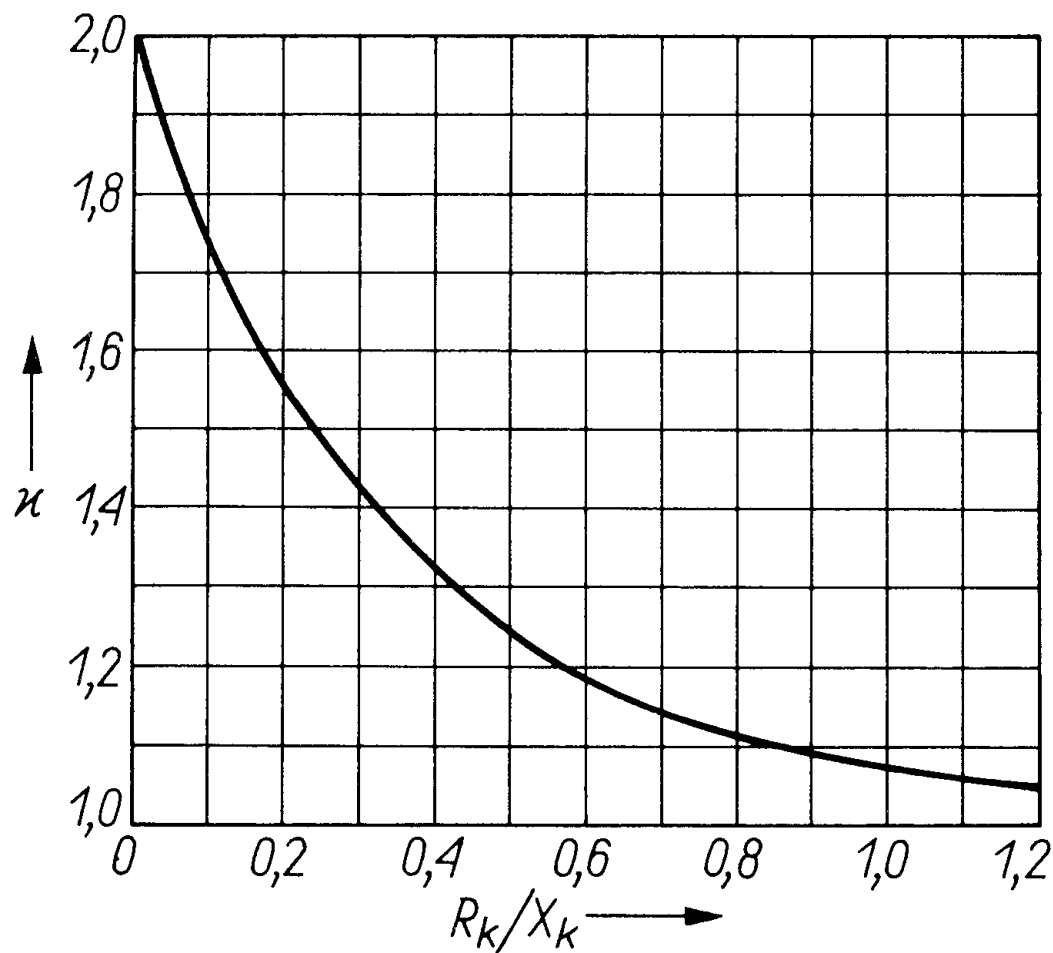
X_k – suma reaktancji zgodnych elementów obwodu zwarciovego połączonych szeregowo.

Rezystancje mogą być pominięte, jeżeli jest spełniony warunek $R_k < 0,3X_k$.

Największą chwilową wartość prądu zwarciovego nazywa się prądem udarowym i_p . Oblicza się go według wzoru:

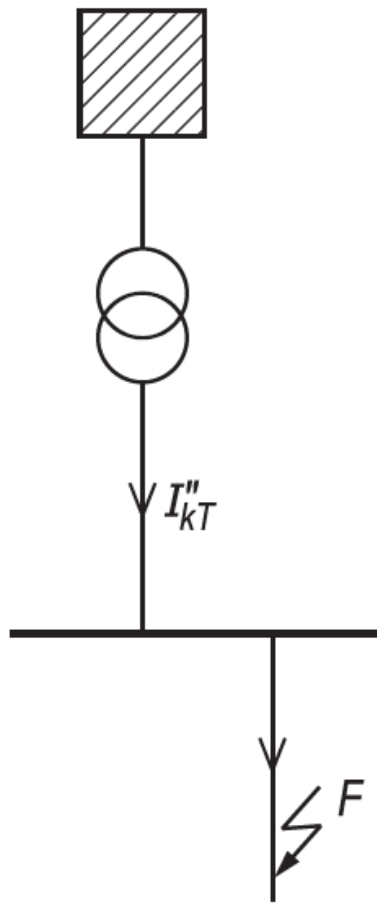
$$i_p = \sqrt{2\kappa} I_k''$$

przy czym κ – współczynnik udaru, którego wartość zależy od ilorazu R_k i X_k obwodu zwarciovego

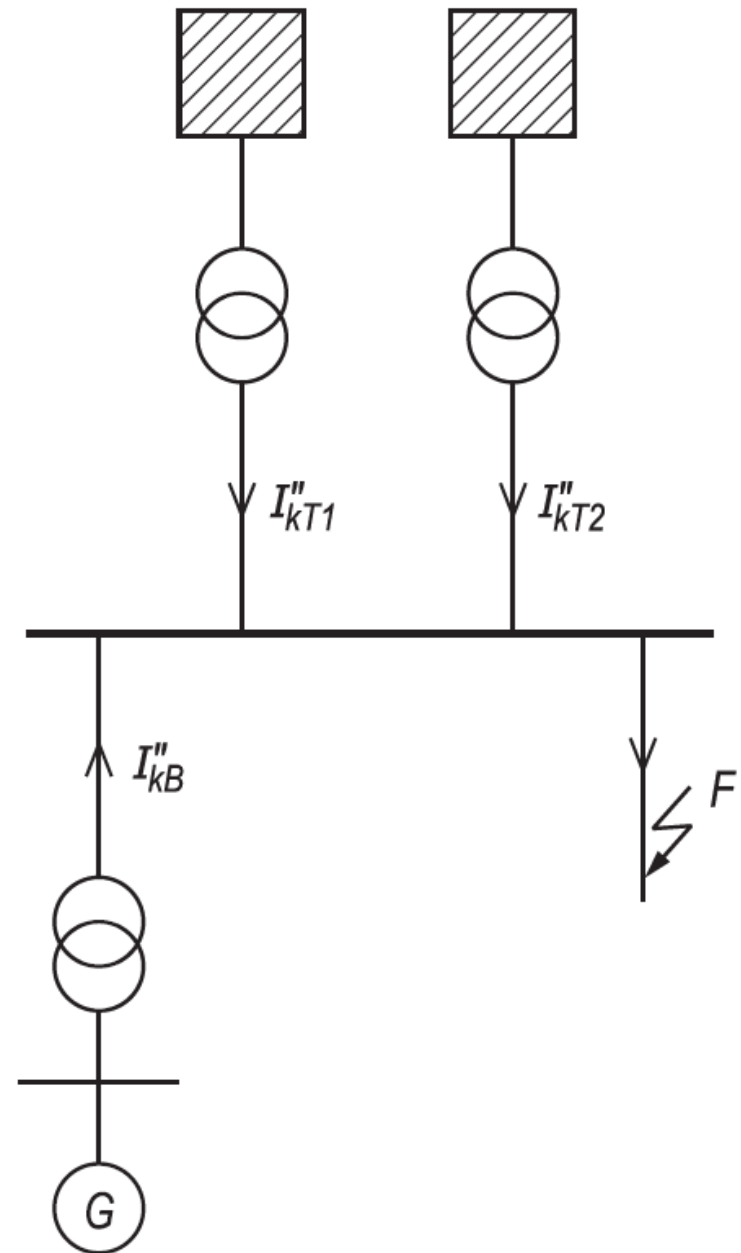


Zależność współczynnika udaru κ od ilorazu R_k/X_k

a)

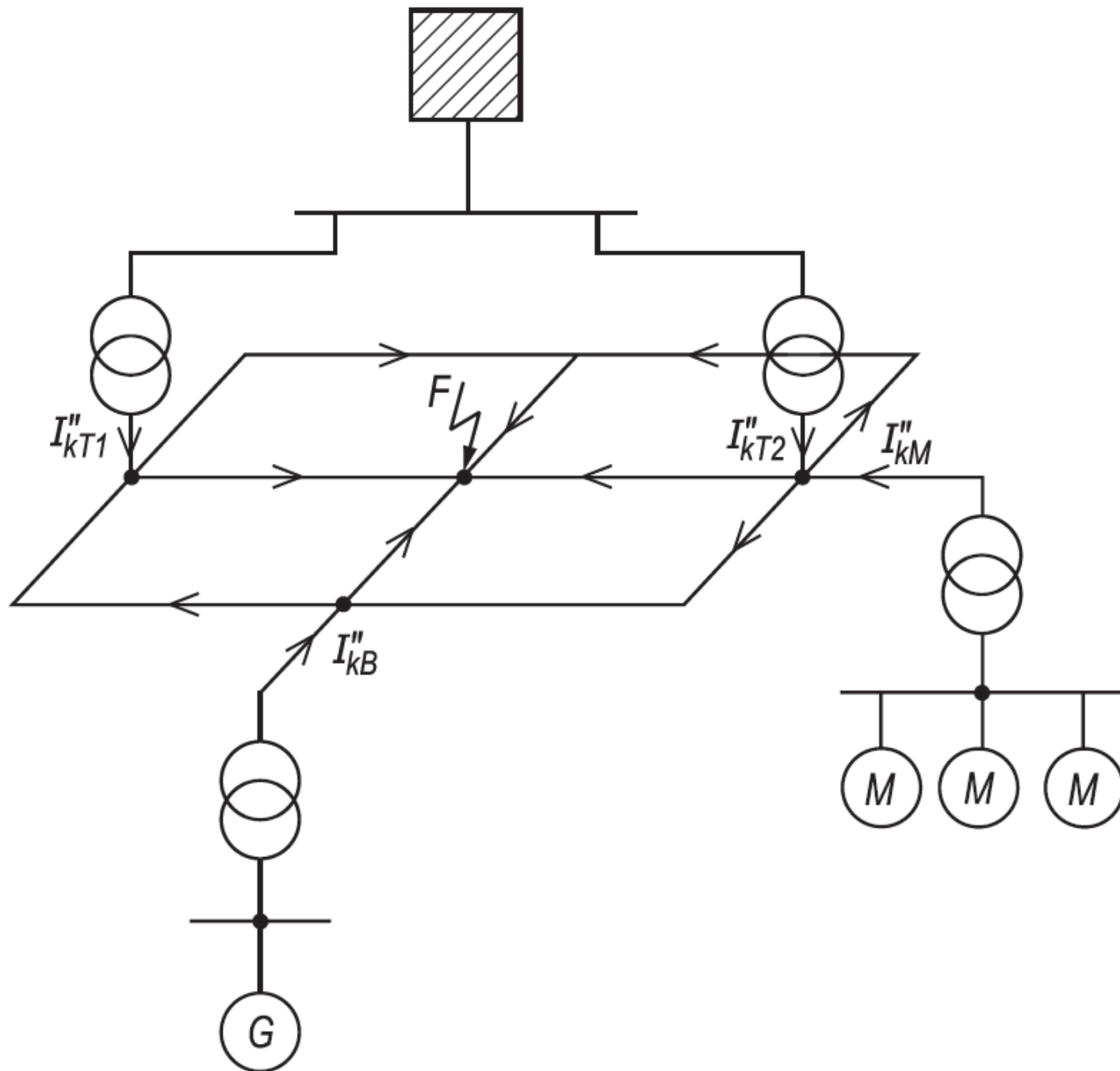


b)



Różne układy sieci warunkujące sposób obliczania prądów zwarciovych:

- a) zasilana jednostronnie;
- b) zasilana z wielu źródeł.



Sieć zamknięta (kratowa)

Współczynnik κ może być obliczony z zależności:

$$\kappa \approx 1,02 + 0,98e^{-3R_k/X_{\partial k}}$$

W sieciach zasilanych z kilku (N) niezależnych źródeł prąd zwarcia początkowy w miejscu zwarcia jest sumą geometryczną prądów zwarcia poszczególnych gałęzi, obliczonych jak dla przypadku zasilania z pojedynczego źródła.

W większości przypadków prądy I''_{ki} mają zbliżone kąty fazowe, tak że prąd zwarcia I''_k może być obliczony jako suma algebraiczna prądów poszczególnych gałęzi:

$$I''_k = \sum_{i=1}^N I''_{ki}$$

Podobnie, udarowy prąd zwarcia w miejscu zwarcia jest sumą prądów i_{pi} w poszczególnych gałęziach:

$$i_p = \sum_{i=1}^N i_{pi}$$

W sieciach zamkniętych prąd zwarcia początkowy I_k'' oblicza się również według wzoru:

$$I_k'' = \frac{cU_N}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}}$$

Rzeczywisty układ impedancji, zawierający elementy połączone szeregowo, równoległe, w gwiazdę i trójkąt należy przekształcić zgodnie z prawami elektrotechniki w jeden element Z_k stanowiący rezystancję R_k i reaktancję X_k , a w układach wysokonapięciowych, w których $X_k \gg R_k$, jedynie reaktancję X_k .

Udarowy prąd zwarcia i_p w sieciach zamkniętych oblicza się według wzoru:

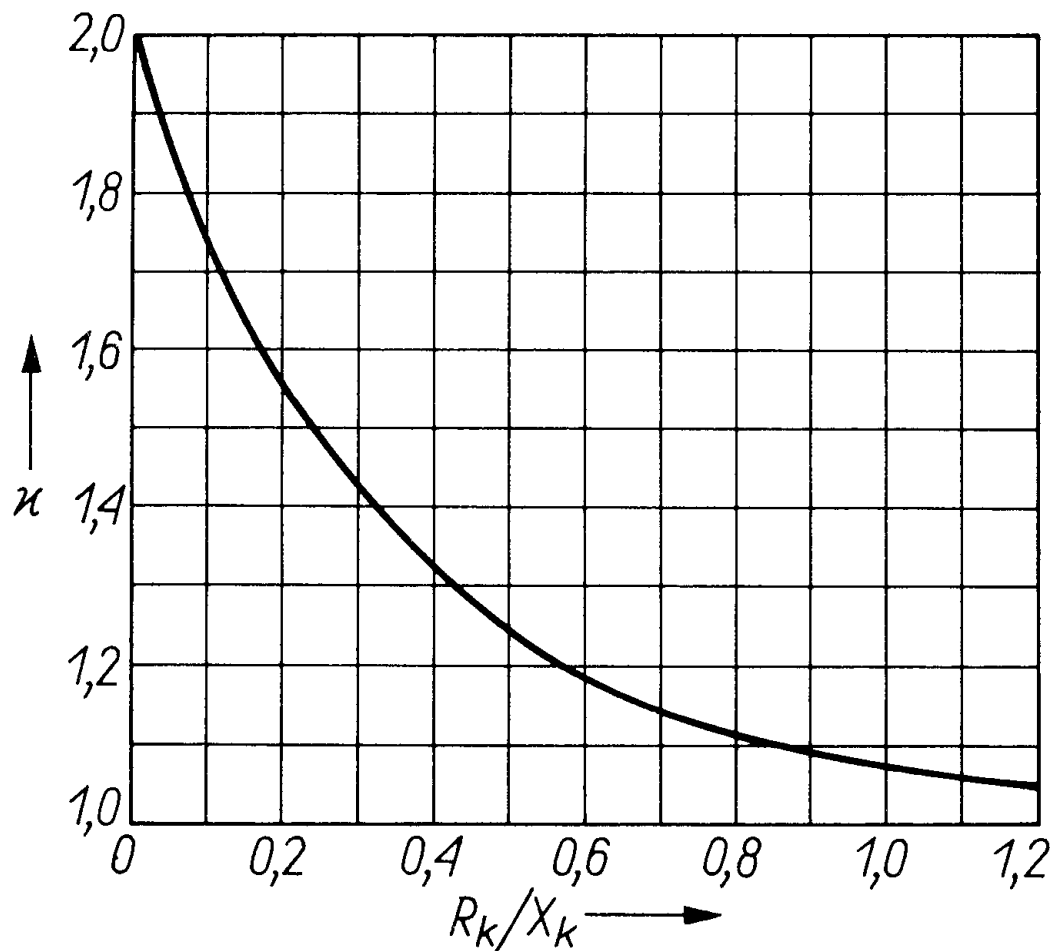
$$i_p = \sum_{i=1}^N i_{pi}$$

Prąd do miejsca zwarcia płynie różnymi gałęziami, o różnej wartości ilorazu R_{ki} i X_{ki} , od którego zależą wartości współczynników udaru K_j .

W zależności od pożądanej dokładności obliczeń współczynnik κ można wyznaczyć trzema metodami: A, B i C.

W metodzie A współczynnik udaru wyznacza się z wykresu

$$\kappa = f(R_k/X_k) :$$



lub według zależności:

$$\kappa \approx 1,02 + 0,98e^{-3R_k/X_{ok}}$$

Do obliczeń κ należy przyjąć tę gałąź, dla której stosunek R do X jest najmniejszy spośród wszystkich gałęzi.

W obliczeniach uwzględnia się te gałęzie, przez które przepływa łącznie co najmniej 80% prądu zwarciovego.

Metoda A wyznaczania współczynnika κ może być stosowana w przypadkach, w których nie wymaga się dużej dokładności obliczeń.

W metodzie B współczynnik udaru κ oblicza się według wzoru:

$$\kappa = 1,15 \kappa_b$$

w którym 1,15 jest współczynnikiem bezpieczeństwa uwzględniającym założenie upraszczające wprowadzone przy przekształcaniu sieci zamkniętych i w obliczeniach impedancji zespolonej $Z_k = R_k + jX_k$ w miejscu zwarcia F.

Współczynnik κ_b wyznacza się z wykresu $\kappa = f(R_k/X_k)$ dla obliczonej wartości R_k/X_k , przy czym reaktancja X_k ma być wyliczona przy częstotliwości sieci 50 Hz.

Niezależnie od wyników obliczeń wartości współczynnika udaru κ , wykonanych według zależności:

$$\kappa = 1,15 \kappa_b$$

nie należy przyjmować wartości większych niż 1,8 w sieciach niskiego napięcia oraz 2,0 w sieciach wysokiego napięcia.

W metodzie C obliczania współczynnika udaru κ wyznacza się impedancję zastępczą:

$$Z_c = R_c + jX_c$$

widzianą z miejsca zwarcia F, gdy zastępcze źródło napięcia o częstotliwości $f_c = 20$ Hz umieszczone w miejscu zwarcia jest jedynym w sieci.

Przy tej częstotliwości otrzymuje się wartości rezystancji i reaktancji zastępczej sieci inne niż przy częstotliwości sieciowej $f = 50$ Hz. Współczynnik κ_c wyznacza się z wykresu $\kappa = f(R_k/X_k)$ dla:

$$\frac{R}{X} = \frac{R_c \cdot f_c}{X_c \cdot f} = 0,4 \frac{R_c}{X_c}$$