

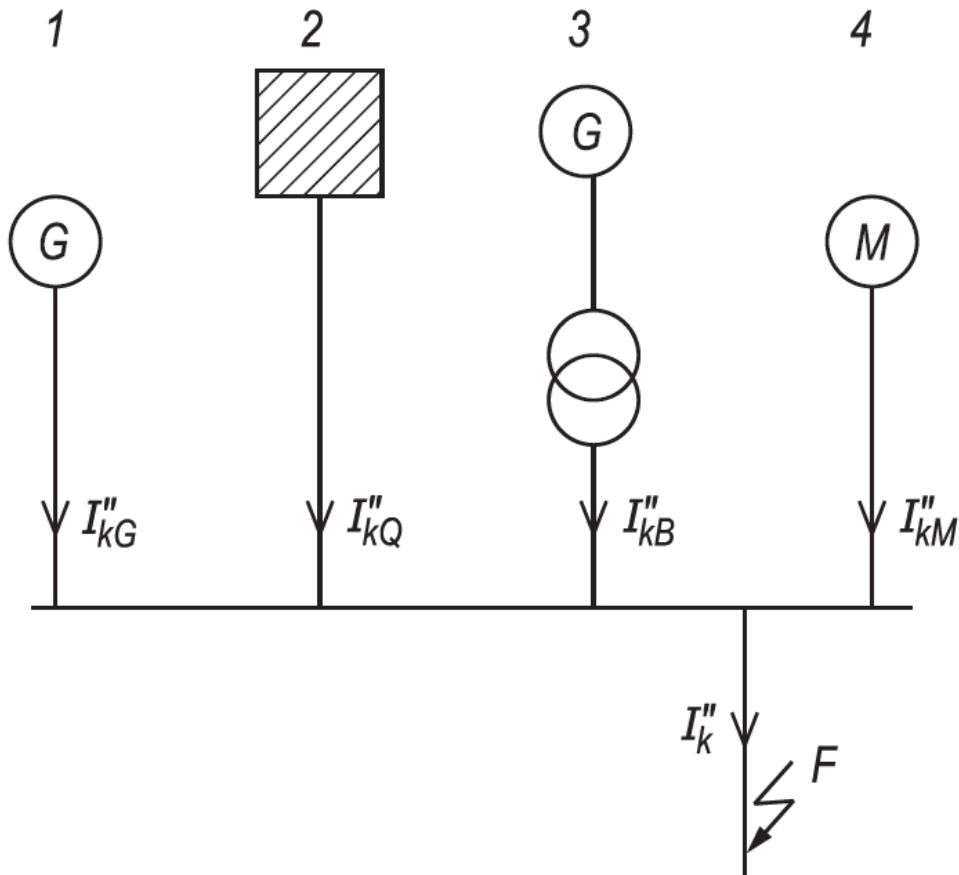
Zwarcia w pobliżu generatora

Zwarcie charakteryzujące się malejącą amplitudą składowej okresowej prądu przyjęto nazywać zwarcie w pobliżu generatora.

W rozważaniach należy uwzględnić wpływ silników synchronicznych i indukcyjnych, jeżeli ich udział w prądzie zwarciovym przekracza 5% prądu początkowego I''_{kQ} obliczonego bez udziału silników.

Zmiana składowej okresowej prądu w czasie trwania zwarcia przy zwarciach pobliskich wynika z tego, że reaktancje maszyn nie mają wartości stałej i zwiększają się w miarę upływu czasu trwania zwarcia.

We fragmentach sieci, w których mogą wystąpić zwarcia określane jako pobliskie, do celów doboru urządzeń, w szczególności łączników, należy wyznaczyć również znamionowy prąd wyłączeniowy symetryczny i niesymetryczny oraz ustalony prąd zwarciovym I_k .



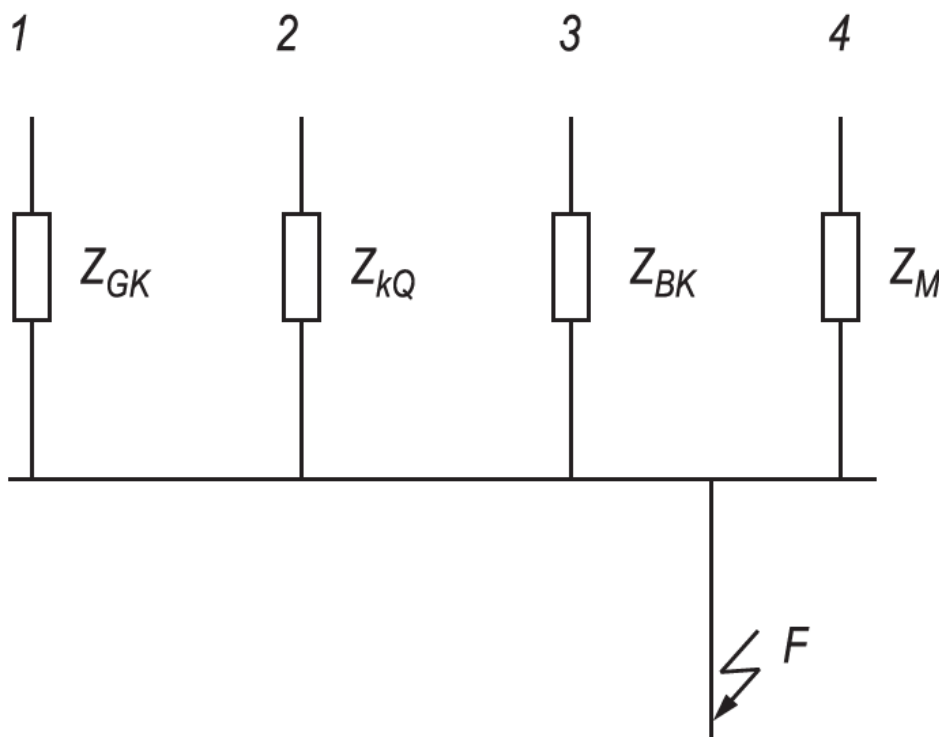
Różne możliwe źródła prądu zwarciovego i odpowiadające im skorygowane impedancje:

1 – generator przy zwarciu na jego zaciskach,

2 – zastępczy system elektroenergetyczny (zwarcie odległe),

3 – generator przy zwarciu po stronie WN bloku generator-transformator,

4 – silnik



Prąd początkowy I_k'' przy zwarcjach pobliskich wyznacza się z zależności:

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

Skorygowaną impedancję zgodną generatora oblicza się według wzoru:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G (R_G + jX_d'')$$

w którym

$$K_G = \frac{c_{\max} U_N}{U_{NG} (1 + x_d'' \sin \varphi_{NG})} \quad X_d'' = \frac{x_{d\%}'' \cdot U_{NG}^2}{100 \cdot S_{NG}} \quad x_d'' = \frac{X_d''}{\frac{U_{NG}^2}{S_{NG}}}$$

gdzie: K_G – współczynnik korekcyjny,

x_d'' – reaktancja podprześciowa generatora (wartość względna),

U_N – napięcie znamionowe sieci,

U_{NG} – napięcie znamionowe generatora,

φ_{NG} – kąt przesunięcia fazowego między prądem i napięciem znamionowym generatora,

S_{NG} – moc znamionowa generatora.

Reaktancje względne maszyn synchronicznych (w procentach)

Reaktancja względna	Turbogeneratory	Generatory z biegunami wydatnymi	
		z uzwojeniami tłumiącymi	bez uzwojeń tłumiących
Podprzejściowa $x''_d\%$ *	9÷22 **	12÷30 ***	20÷40 ***
Przejściowa $x'_d\%$ **	14÷35 ****	20÷45	20÷40
Synchroniczna $x_d\%$	140÷300	80÷180	80÷180
Dla składowej przeciwnej $x_{2\%}$	9÷22	10÷25	30÷50
Dla składowej zerowej $x_{0\%}$	3÷10	5÷20	5÷25

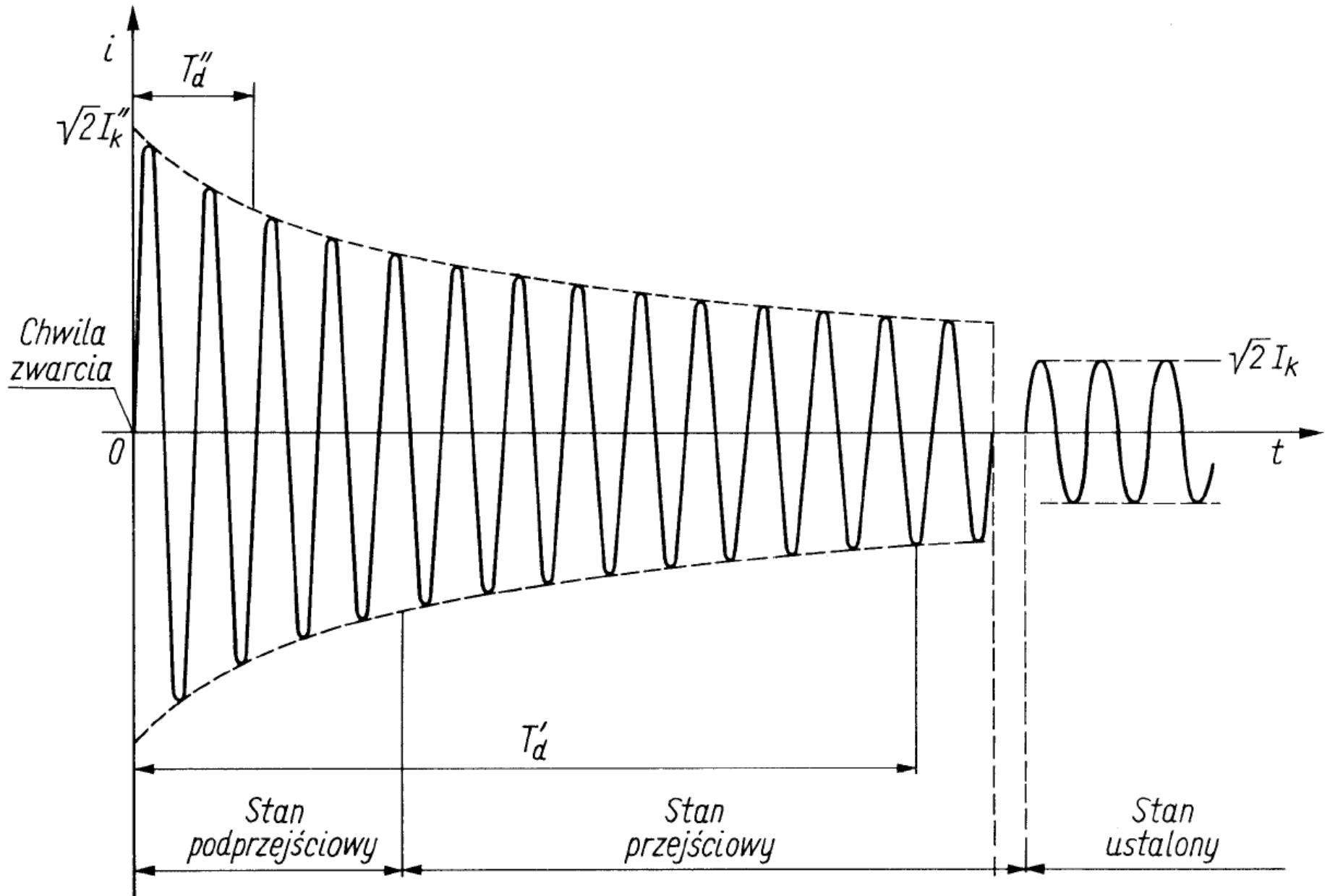
* W stanie nasycenia.

** Większe wartości dotyczą maszyn o większych mocach znamionowych; wartości najmniejsze dotyczą generatorów niskiego napięcia.

*** Większe wartości dotyczą maszyn wolnoobrotowych ($n < 375$ obr/min).

**** Maszyny o mocach znamionowych większych od 1000 MVA mogą osiągać wartości 40÷45%.

O wartości prądu zwarciovego generatora w stanie podprzejściowym decyduje reaktancja podprzejściowa X''_d , w stanie przejściowym reaktancja przejściowa X'_d , a w stanie ustalonym reaktancja X_d .



Przebieg składowej okresowej prądu zwarciovego w fazie stojana generatora w stanie nieustalonym:

T_d'' – stała czasowa tłumienia obwodu klatki tłumiącej,

T_d' – stała czasowa tłumienia uzwojeń wzbudzenia,

I_k – prąd ustalony

W obliczeniach praktycznych rezystancje generatorów R_G można przyjmować jako:

$0,05 X_d''$ – dla generatorów o mocy $S_{NG} \geq 100$ MVA,

$0,07 X_d''$ – dla generatorów o mocy $S_{NG} < 100$ MVA,

$0,15 X_d''$ – dla generatorów o napięciu znamionowym $U_{NG} \leq 1$ kV.

Reaktancje dla składowej przeciwnej maszyn z biegunami utajonymi i maszyn z biegunami jawnymi mających uzwojenia tłumiące można przyjąć jako równe reaktancji dla składowej symetrycznej zgodnej.

Dla maszyn z biegunami jawnymi bez uzwojeń tłumiących:

$$X_2 \approx 1,45 X_1$$

Reaktancja generatora dla składowej zerowej zależy od konstrukcji maszyny i może zawierać się w granicach $(0,1 \dots 1) X_1$, przeciętnie

$$X_0 \approx 0,4 X_1$$

Przy obliczaniu prądów zwarciovych, po stronie górnego napięcia bloku generator-transformator (rysunek powyżej), skorygowaną impedancję wypadkową bloku oblicza się według wzoru:

$$\underline{Z}_{BK} = K_B \left(\vartheta_N^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_T \right)$$

w którym

$$K_B = \left(\frac{U_N}{U_{NG}} \right)^2 \left(\frac{U_{TL}}{U_{TH}} \right)^2 \frac{c_{\max}}{1 + \left(x_d'' - \Delta u_x \right) \sin \varphi_{NG}}$$

przy czym:

K_B – współczynnik korekcyjny bloku generator-transformator,

$\vartheta_T = U_{TH}/U_{TL}$ – rzeczywista przekładnia transformatora blokowego,

$\vartheta_N = U_{NG}/U_N$ – znamionowa przekładnia transformatora,
odpowiadająca podstawowemu położeniu
przełącznika zaczeów,

Z_T – impedancja transformatora blokowego odniesiona do strony
górnego napięcia,

Δu_x – reaktancja względna transformatora (względne napięcie
rozproszenia), $\Delta u_x = \Delta U_{x\%}/100$.

Impedancję silników synchronicznych (rysunek powyżej) oraz kompensatorów synchronicznych oblicza się tak samo jak generatorów. Impedancję silników indukcyjnych dla składowej zgodnej i przeciwnej wyznacza się według wzoru:

$$Z_M = \frac{U_{NM}}{k_r \sqrt{3} I_{NM}} = \frac{U_{NM}^2}{k_r S_{NM}}$$

w którym

$$S_{NM} = \frac{P_{NM}}{\eta \cos \varphi_N}$$

gdzie:

U_{NM} – napięcie znamionowe silnika,

I_{NM} – prąd znamionowy silnika,

k_r – współczynnik rozruchu, równy ilorazowi prądu rozruchowego i prądu znamionowego silnika,

P_{NM} – moc znamionowa silnika,

$\cos \varphi_N$ – znamionowy współczynnik mocy,

η – sprawność znamionowa.

W przypadkach zwarcia na zaciskach silnika lub w sieci, w miejscu nieodległym od silnika, można pomiąć impedancję przewodów łączących, jako wielokrotnie mniejszą od impedancji Z_M .

Wówczas prąd początkowy I''_{kM} jest wyrażony wzorem:

$$I''_{kM} = ck_r I_{NM}$$

Prąd udarowy od silników i_{pM} należy wyznaczyć zgodnie z zależnością:

$$i_{pM} = \sqrt{2} \kappa_M I''_{kM}$$

Przy czym współczynnik udaru κ_M należy odczytać z wykresu.

Przy braku dokładnych danych dotyczących R_M/X_M w obliczeniach praktycznych można przyjmować:

$\kappa_M = 1,75$ dla silników wysokiego napięcia o mocy odniesionej do jednej pary biegunów ≥ 1 MW, co odpowiada $R_M/X_M = 0,10$;

$\kappa_M = 1,65$ dla silników wysokiego napięcia o mocy odniesionej do jednej pary biegunów < 1 MW, co odpowiada $R_M/X_M = 0,15$;

$\kappa_M = 1,3$ dla silników niskiego napięcia zasilanych liniami kablowymi, co odpowiada $R_M/X_M = 0,42$.

Obliczanie charakterystycznych wartości prądu zwarciovego

Zależności podstawowe

Przy zwarciach pobliskich składowa okresowa prądu zwarciovego maleje z upływem czasu trwania zwarcia.

W obliczeniach należy wyznaczyć m.in. wartości prądów wyłączeniowych zależnych od składowej okresowej prądu w chwili rozdzielenia się styków łącznika.

Prąd udarowy i_p oblicza się według zależności:

$$i_p = \sqrt{2} K I_k'' \quad i_p = \sum_{i=1}^N i_{pi}$$

przy czym prąd początkowy I_{kG}'' oraz I_{kB}'' należy obliczyć według wzoru:

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

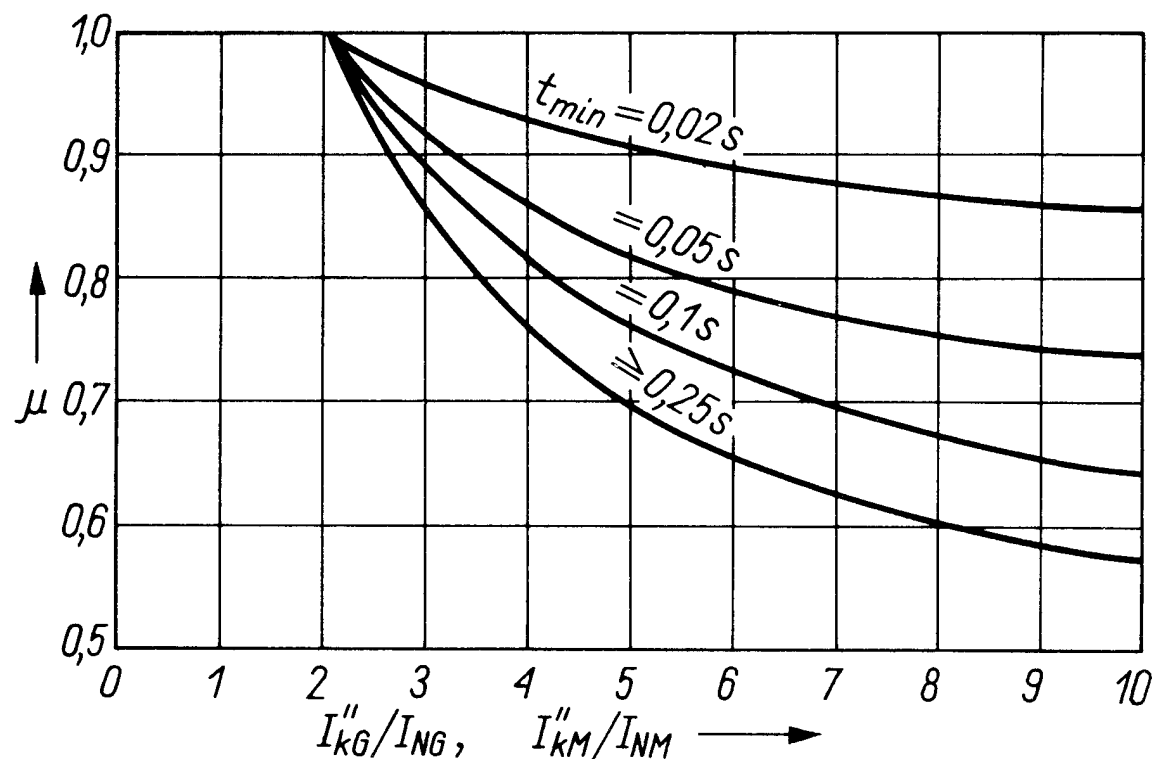
dla skorygowanych wartości impedancji Z_{GK} i Z_{BK} , zgodnie z:

$$Z_{GK} = K_G (R_G + jX_d'') \quad Z_{BK} = K_B (g_N^2 Z_G + Z_T)$$

Prąd wyłączeniowy symetryczny I_b jest mniejszy od prądu początkowego I_k'' . Zmniejszanie się składowej okresowej prądu zwarciovego uwzględnia współczynnik μ według zależności:

$$I_b = \mu I_k''$$

Wartość współczynnika μ zależy od czasu t_{min} liczonego od chwili wystąpienia zwarcia do chwili rozdzielenia się styków pierwszego bieguna łącznika.



Zależność współczynnika μ od czasu trwania zwarcia (t_{min}) oraz ilorazu prądu początkowego i prądu znamionowego generatora (I_{kG}''/I_{NG}) oraz prądu znamionowego silnika (I_{kM}''/I_{NM})

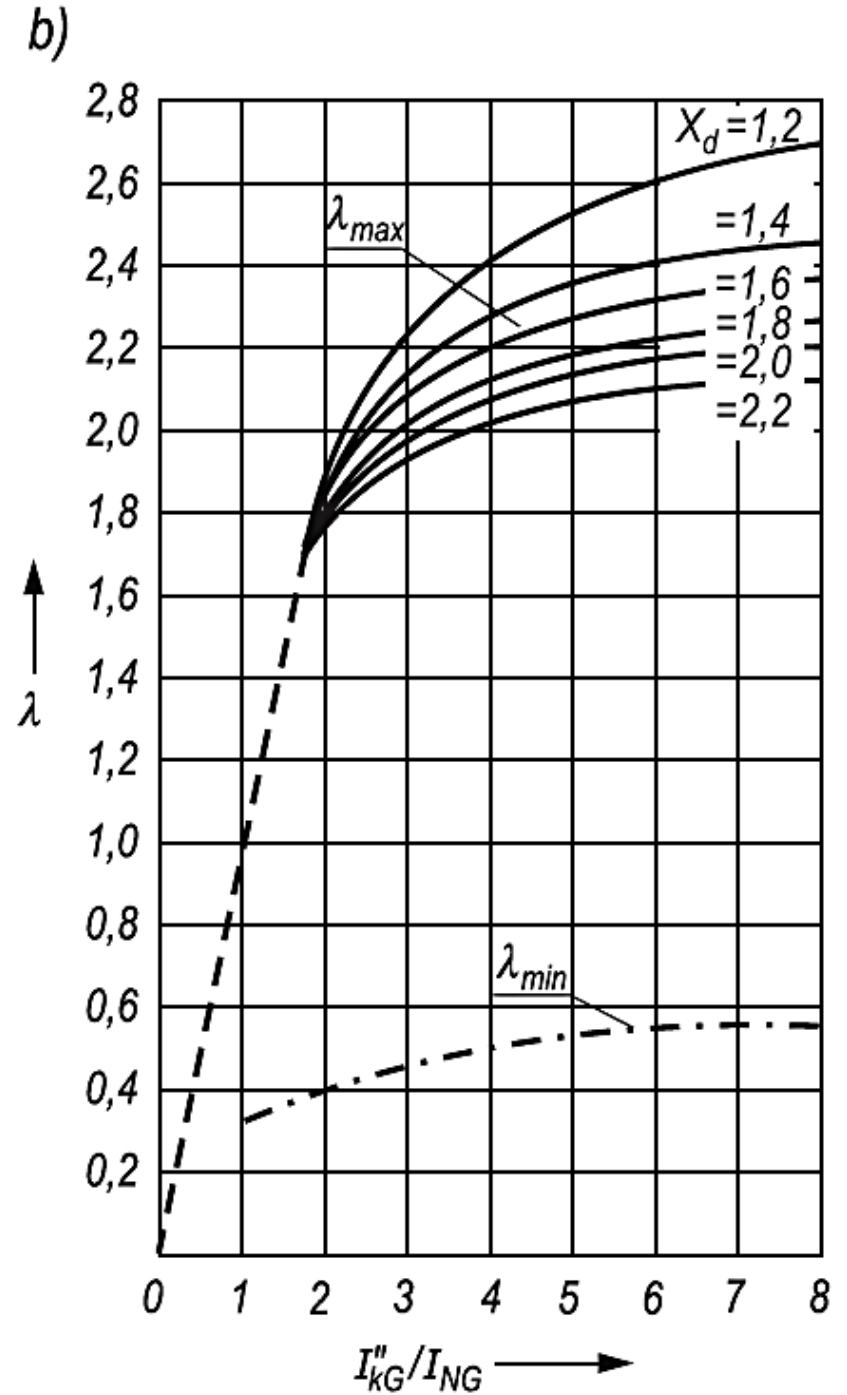
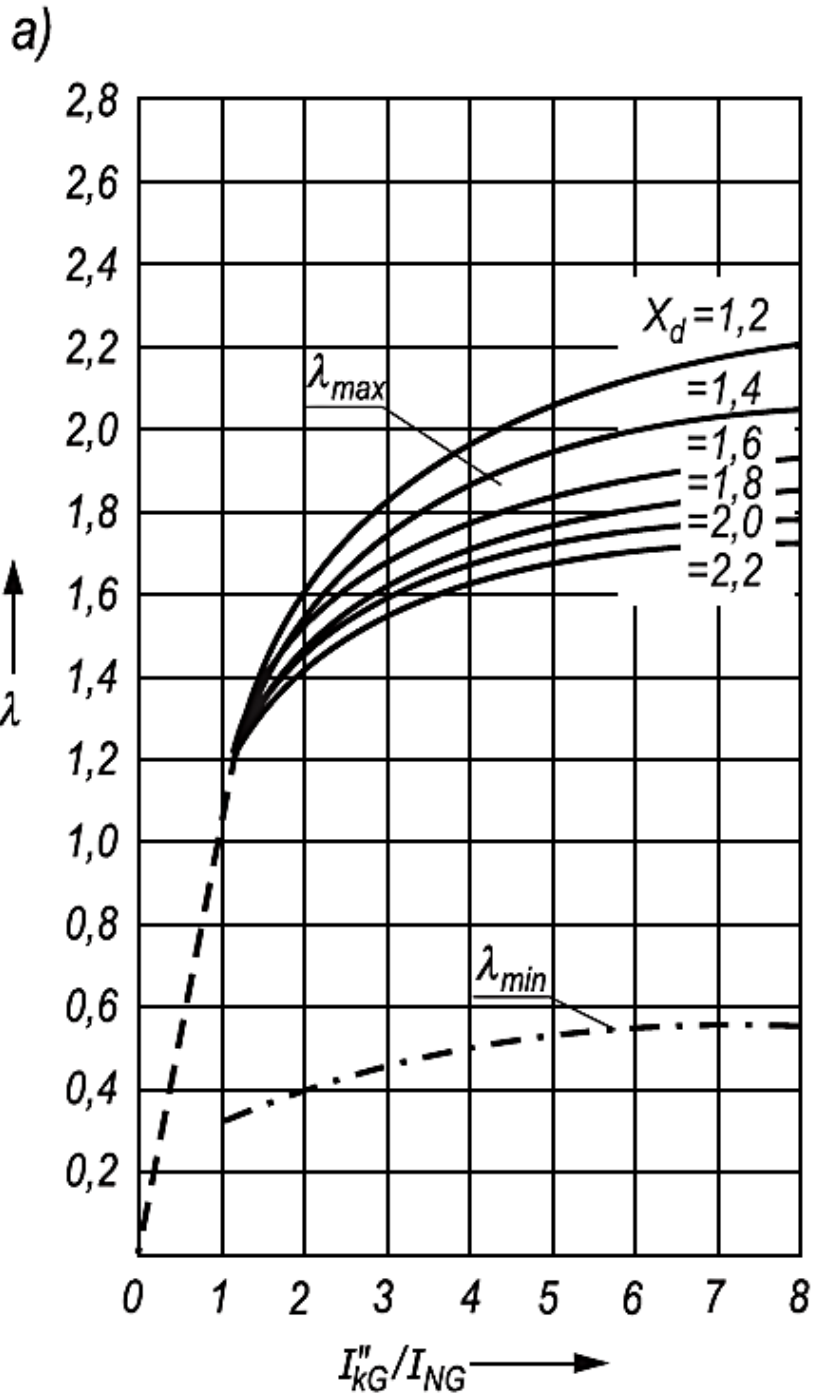
Ustalony prąd zwarciovowy generatora I_{kG} zależy od typu generatora oraz stanu nasycenia jego obwodu magnetycznego w czasie trwania zwarcia.

Wartość prądu I_{kG} może być obliczona według wzoru:

$$I_{kG} = \lambda I_{NG}$$

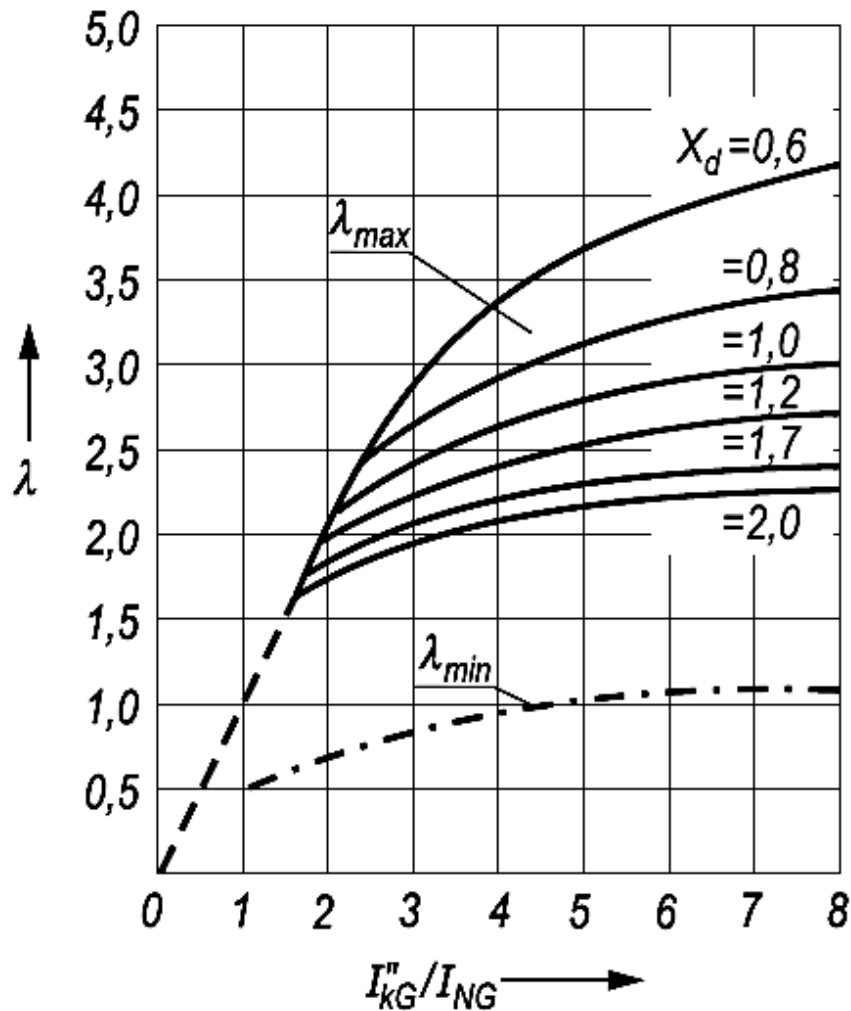
w którym λ – współczynnik zależny od reaktancji synchronicznej generatora X_d w stanie nasyconym oraz poziomu wzbudzenia generatora (zależność $\lambda = f(X_d)$ na poniższych rysunkach).

W zależności od warunków pracy generatora prąd ustalony może zawierać się między wartościami I_{kmax} oraz I_{kmin} odpowiadającymi największej i najmniejszej wartości współczynnika λ , przy czym λ_{min} dotyczy wzbudzenia maszyny synchronicznej w stanie pracy jałowej.

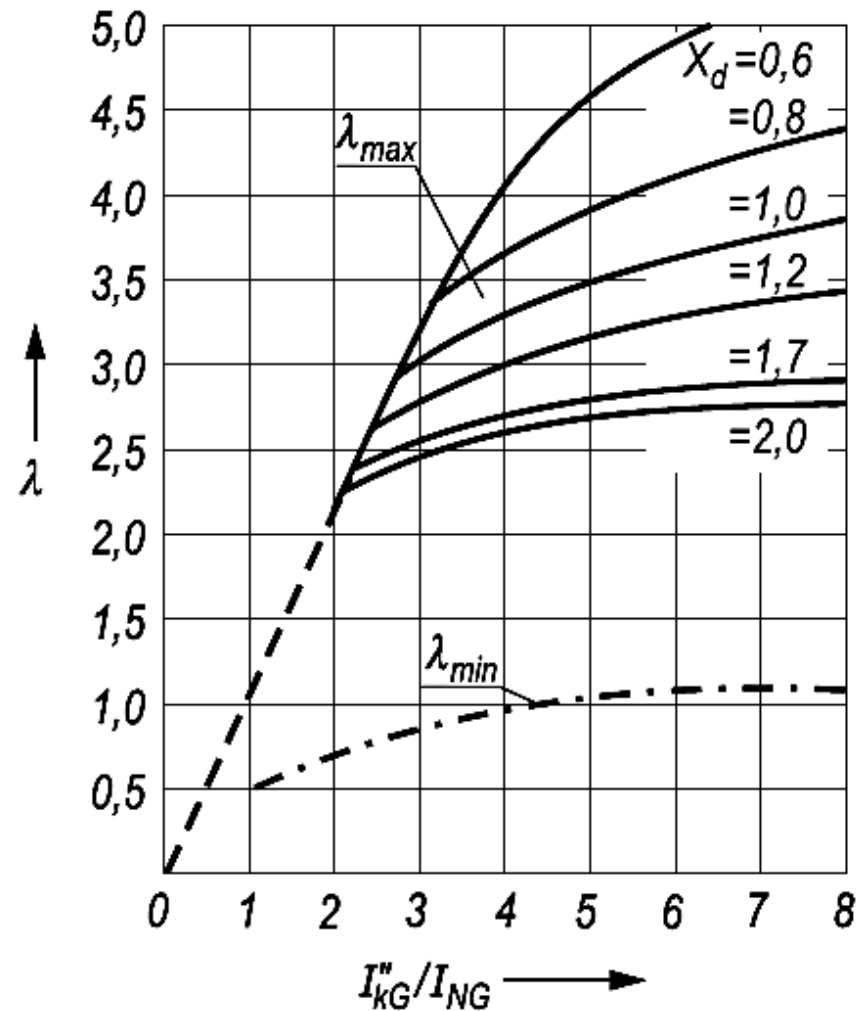


Największe (λ_{max}) i najmniejsze (λ_{min}) wartości współczynników λ turbogeneratorów w zależności od I''_{kG}/I_{NG} oraz reaktancji synchronicznej w stanie nasycenia X_d : a) dotyczy poziomu wzbudzenia równemu 1,3-krotnemu znamionowemu napięciu wzbudzenia przy obciążeniu znamionowym i znamionowym współczynniku mocy; b) 1,6-krotnemu znamionowemu napięciu wzbudzenia

c)



d)



Największe (λ_{max}) i najmniejsze (λ_{min}) wartości współczynników λ maszyn jawnobiegunowych w zależności od I''_{kG}/I_{NG} oraz reaktancji synchronicznej w stanie nasycenia X_d : c) 1,6-krotnemu znamionowemu napięciu wzbudzenia; d) 2-krotnemu znamionowemu napięciu wzbudzenia

Prąd zwarciovowy nieokresowy i_{DC} – składowa nieokresowa prądu zwarciovowego określona zależnością:

$$i_{DC} = \sqrt{2}I_k'' e^{-\frac{R}{L}t}$$

w której:

R i L – rezystancja i indukcyjność obwodu zwarciovowego,

t – czas.

Moc zwarciovowa początkowa S_k'' jest określona zależnością:

$$S_k'' = \sqrt{3}U_N I_k''$$

Moc zwarciovowa S_k'' nie ma znaczenia fizykalnego, jest bowiem iloczynem prądu początkowego I_k'' i napięcia znamionowego U_N , a zatem wielkości nie występujących jednocześnie.

Odniesiona do określonego miejsca w systemie elektroenergetycznym dobrze jednak charakteryzuje warunki zwarciovowe i może być podstawą obliczenia wartości różnych charakterystycznych wielkości prądu zwarciovowego.

Prąd zwarciaowy cieplny I_{th} – prąd zastępczy o stałej wartości skutecznej, który w czasie trwania zwarcia t_k wydzieli w torze prądowym taką samą ilość ciepła jak prąd zwarciaowy o rzeczywistym przebiegu.

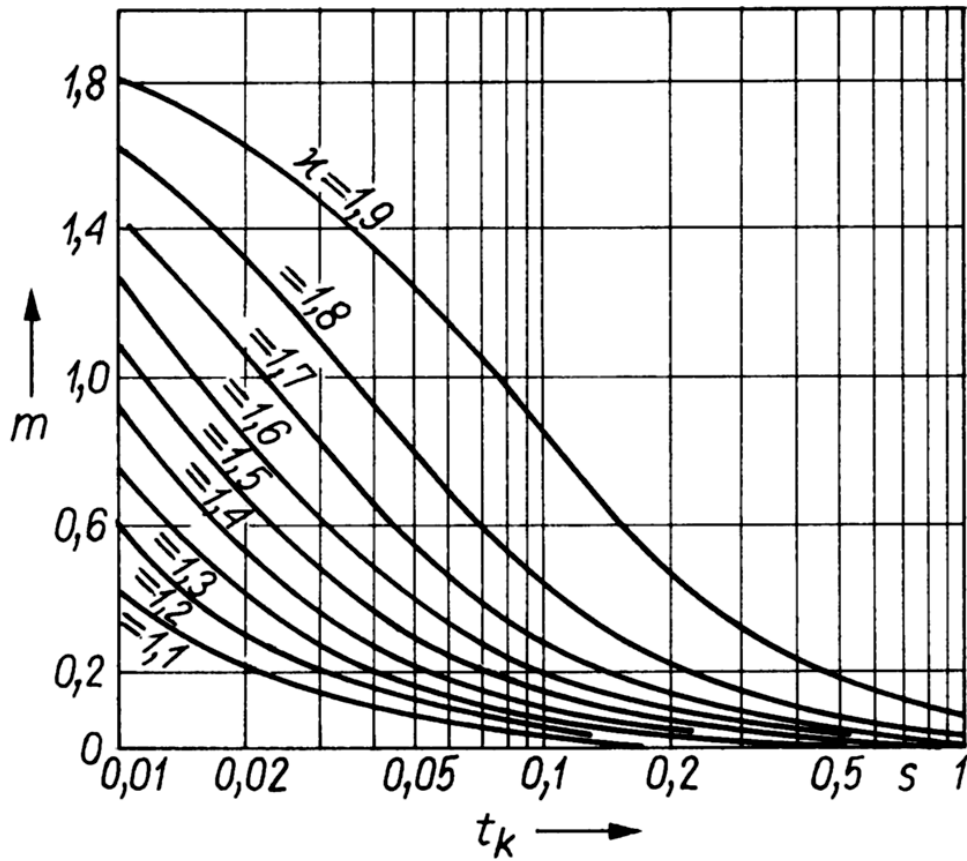
Prąd ten wyznacza się z zależności:

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m+n}$$

w której: m , n – współczynniki uwzględniające wpływ zmian składowej nieokresowej (m) oraz okresowej (n) prądu zwarciaowego (przedstawione na poniższym rysunku).

W przypadku zwarć odległych przyjmuje się zwykle $n = 1$, a wartości współczynników κ wyznacza się z wykresu dla ustalonych wartości R_k/X_k .

a)



Współczynniki do określania zastępczego prądu cieplnego I_{th} uwzględniające wpływ prądu zwarciovego:

a) składowej nieokresowej m ;

b) składowej okresowej n ;

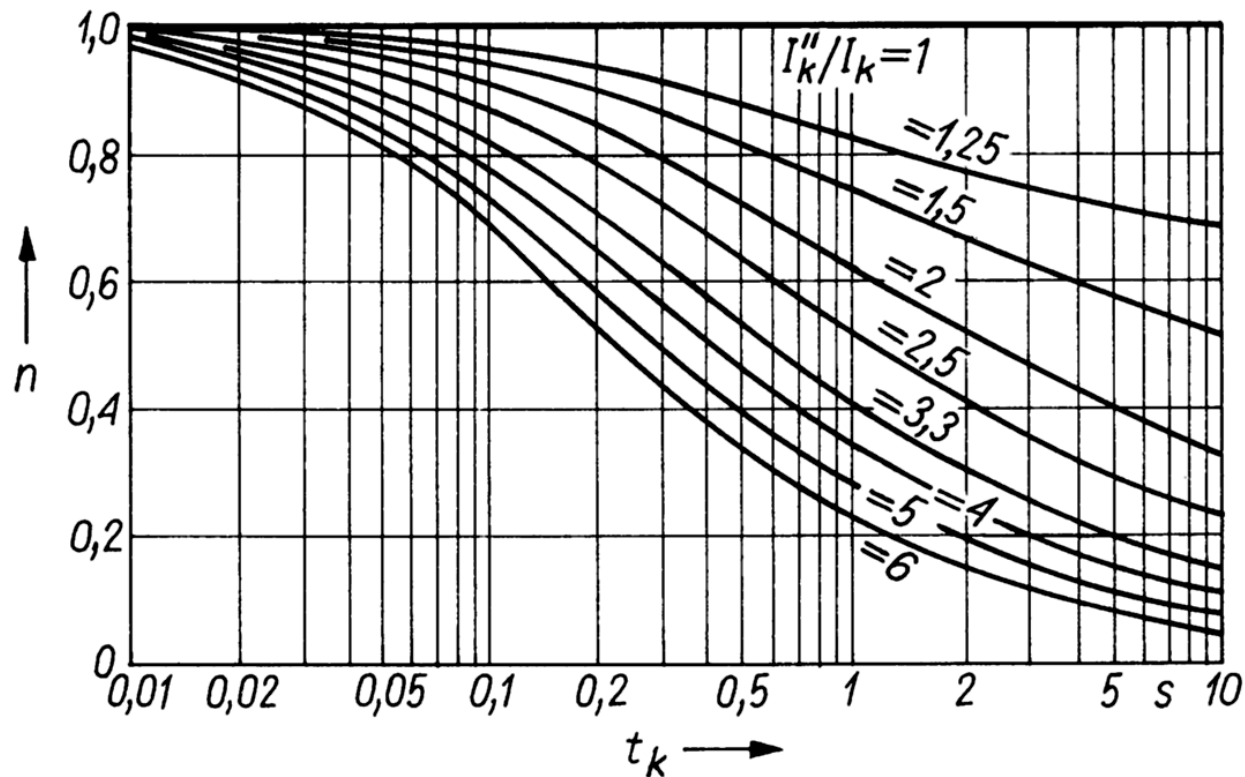
t_k – czas trwania zwarcia,

κ – współczynnik udaru,

I_k'' – prąd początkowy,

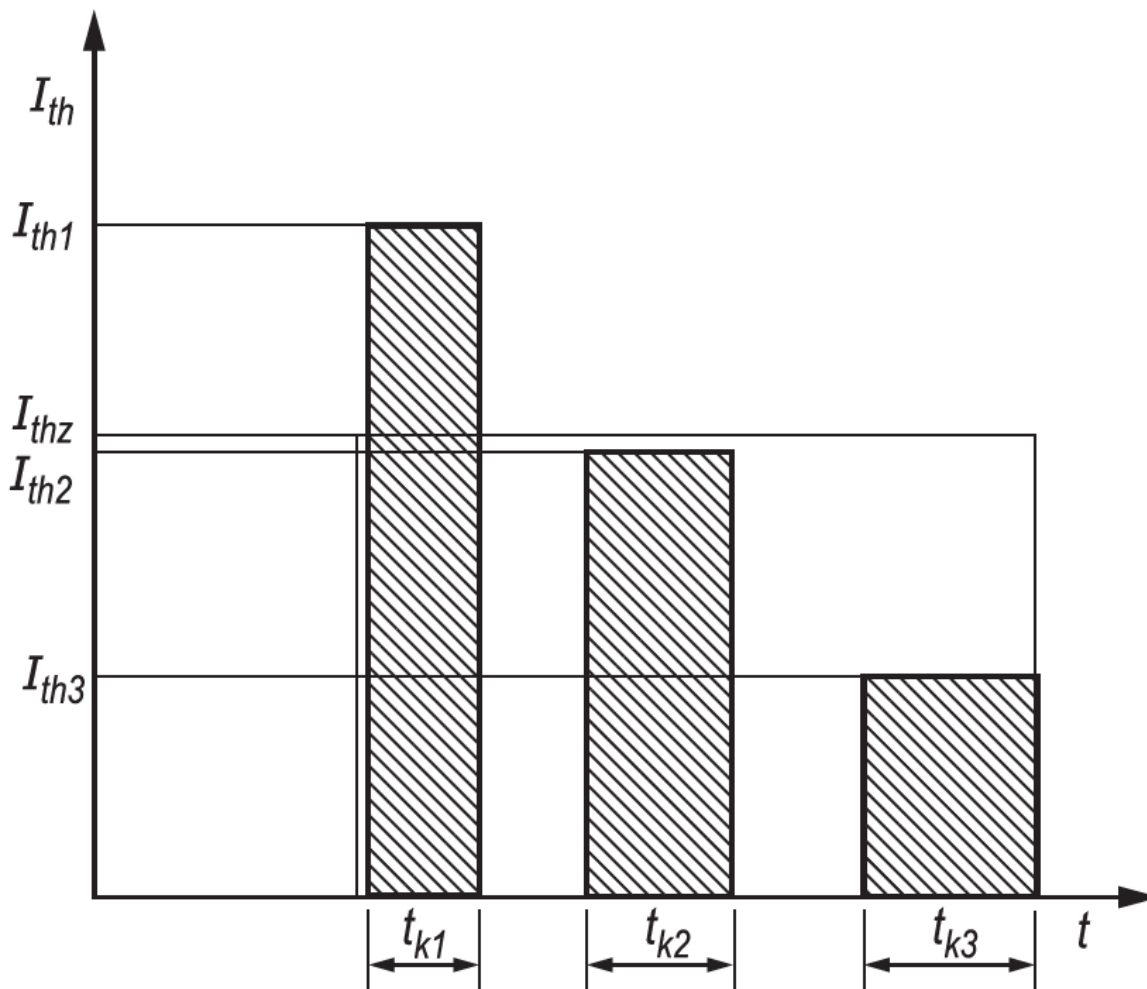
I_k – ustalony prąd zwarciovowy.

b)



W przypadku powtarzających się zwarć z krótkimi okresami bezprądowymi, w układach z automatyką samoczynnego ponownego załączania (SPZ), w obliczeniach praktycznych skutków cieplnych nie uwzględnia się wpływu chłodzenia w okresach bezprądowych, a zastępczy cieplny prąd zwarcia oblicza się według wzoru:

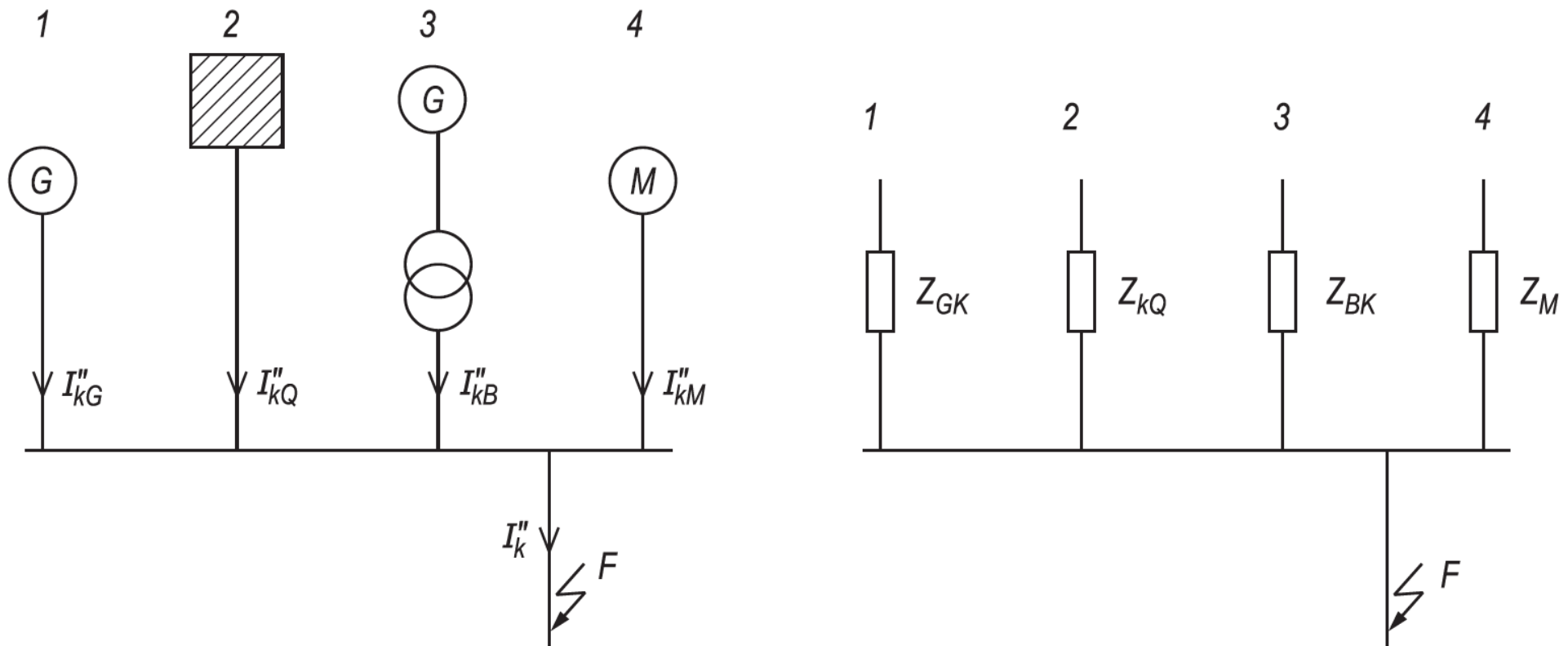
$$I_{thz} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \sum_{i=1}^n I_{thi}^2 t_{ki}} \quad t_k = \sum_{i=0}^n t_{ki}$$



Uprozczone przebiegi krótkotrwałych prądów cieplnych I_{thi} w układzie z automatyką dwukrotnego samoczynnego ponownego załączania (SPZ)

Zwarcia trójfazowe zasilane z kilku niezależnych źródeł

W przypadku zwarcia w takim miejscu sieci, że jest ono zasilane z kilku niezależnych źródeł, przy czym dla niektórych z nich jest to zwarcie odległe, a dla innych zwarcie pobliskie, wartości charakterystycznych wielkości prądu zwarciovego oblicza się jako sumę prądów pochodzących od poszczególnych źródeł.



Różne możliwe źródła prądu zwarciovego i odpowiadające im impedancje skorygowane: 1 – generator przy zwarciu pobliskim, 2 – system elektroenergetyczny (zwarcie odległe), 3 – blok generator-transformator, 4 – silnik

Obliczanie sumarycznych wartości charakterystycznych wielkości prądu zwarciovego:

– początkowy prąd zwarcia:

$$I_k'' = I_{kG}'' + I_{kQ}'' + I_{kB}'' + I_{kM}''$$

– prąd udarowy

$$i_p = i_{pG} + i_{pQ} + i_{pB} + i_{pM}$$

– prąd wyłączeniowy symetryczny

$$I_b = I_{bG} + I_{kQ}'' + I_{bB} + I_{bM}$$

– prąd ustalony

$$I_k = I_{kG} + I_{kQ}'' + I_{kB}$$

Silniki indukcyjne przy zwarciu trójfazowym nie wpływają na wartość prądu ustalonego I_k .

Przy obliczaniu prądu początkowego od generatora I_{kG}'' lub bloku generator-transformator I_{kB}'' należy uwzględnić impedancje skorygowane tych maszyn Z_{GK} i Z_{BK} według wzorów:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G (R_G + jX_d'') \quad \underline{Z}_{BK} = K_B (g_N^2 \underline{Z}_G + \underline{Z}_T)$$

Wpływ silników na niektóre charakterystyczne wielkości prądu zwarciovego

Przy obliczaniu charakterystycznych wielkości prądu zwarciovego (I_k'' , i_p , I_b , I_k) silniki i kompensatory synchroniczne traktuje się tak, jak generatory synchroniczne.

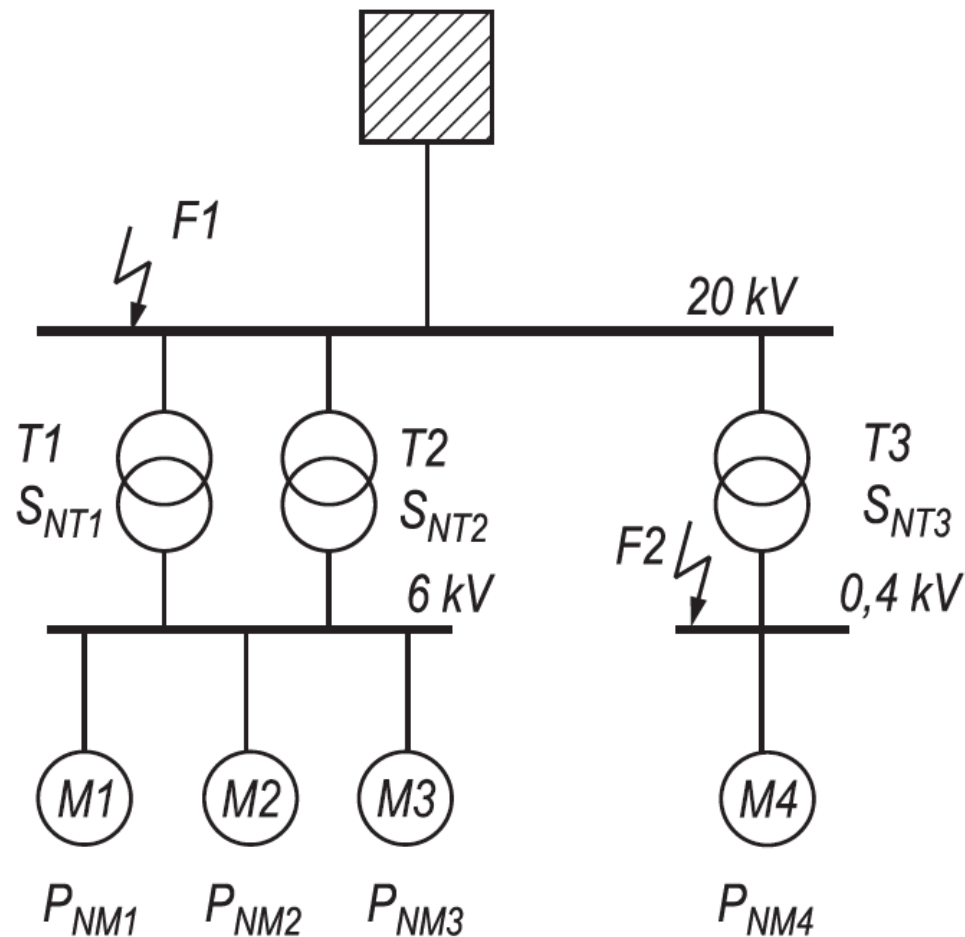
Silniki indukcyjne, zarówno wysokiego, jak i niskiego napięcia wpływają na wartości prądu początkowego I_k'' , prądu udarowego i_p oraz prądu wyłączeniowego I_b , a w przypadkach zwarcń niesymetrycznych również na ustalony prąd zwarciovowy I_k .

W obliczeniach prądów zwarciovych należy zawsze uwzględnić silniki wysokiego napięcia – nie ze względu na ich napięcie znamionowe – lecz dlatego, że są to zawsze silniki o dużych mocach znamionowych oraz odpowiednio dużych wartościach prądów znamionowych i zwarciovych.

Silniki niskiego napięcia bierze się pod uwagę po uprzednim oszacowaniu ich wpływu na wartość prądu zwarciovego.

Można pominąć wpływ silników przyłączonych do sieci rozdzielczych niskiego napięcia.

Schemat sieci ilustrujący sposób obliczania wpływu silników wysokiego i niskiego napięcia na wartość prądu zwarciovego przy zwarciach w różnych punktach sieci.



$$\sum_{i=1}^3 S_{NTi} = S_{NT1} + S_{NT2} + S_{NT3}; \quad \sum_{i=1}^4 P_{NMi} = P_{NM1} + P_{NM2} + P_{NM3} + P_{NM4}$$

Prąd początkowy silnika oblicza się według zależności:

$$I''_{kM} = \frac{cU_N}{\sqrt{3}Z_M}$$

w której Z_M – impedancja silnika wyznaczona ze wzoru:

$$Z_M = \frac{U_{NM}}{k_r \sqrt{3} I_{NM}} = \frac{U_{NM}^2}{k_r S_{NM}}$$

gdzie k_r – krotność prądu rozruchu silnika.

Przy zwarciach blisko silnika można korzystać z zależności:

$$I''_{kM} = ck_r I_{NM}$$

Można pominąć wpływ silników niskiego lub wysokiego napięcia przyłączonych do sieci i zasilających zwarcie za pośrednictwem transformatorów, jeżeli jest spełniona nierówność:

$$\sum_{i=1}^N P_{NMi} \leq \frac{0,8 \sum_{i=1}^M S_{NTi}}{\left| c100 \frac{\sum_{i=1}^M S_{NTi}}{S''_{kQ}} - 0,3 \right|}$$

w której:

$\sum_{i=1}^N P_{NMI}$ – suma mocy znamionowych wszystkich silników, kW;

$\sum_{i=1}^M S_{NTi}$ – suma mocy znamionowych transformatorów, kVA;

N – liczba silników pracujących równocześnie;

M – liczba transformatorów pracujących równocześnie;

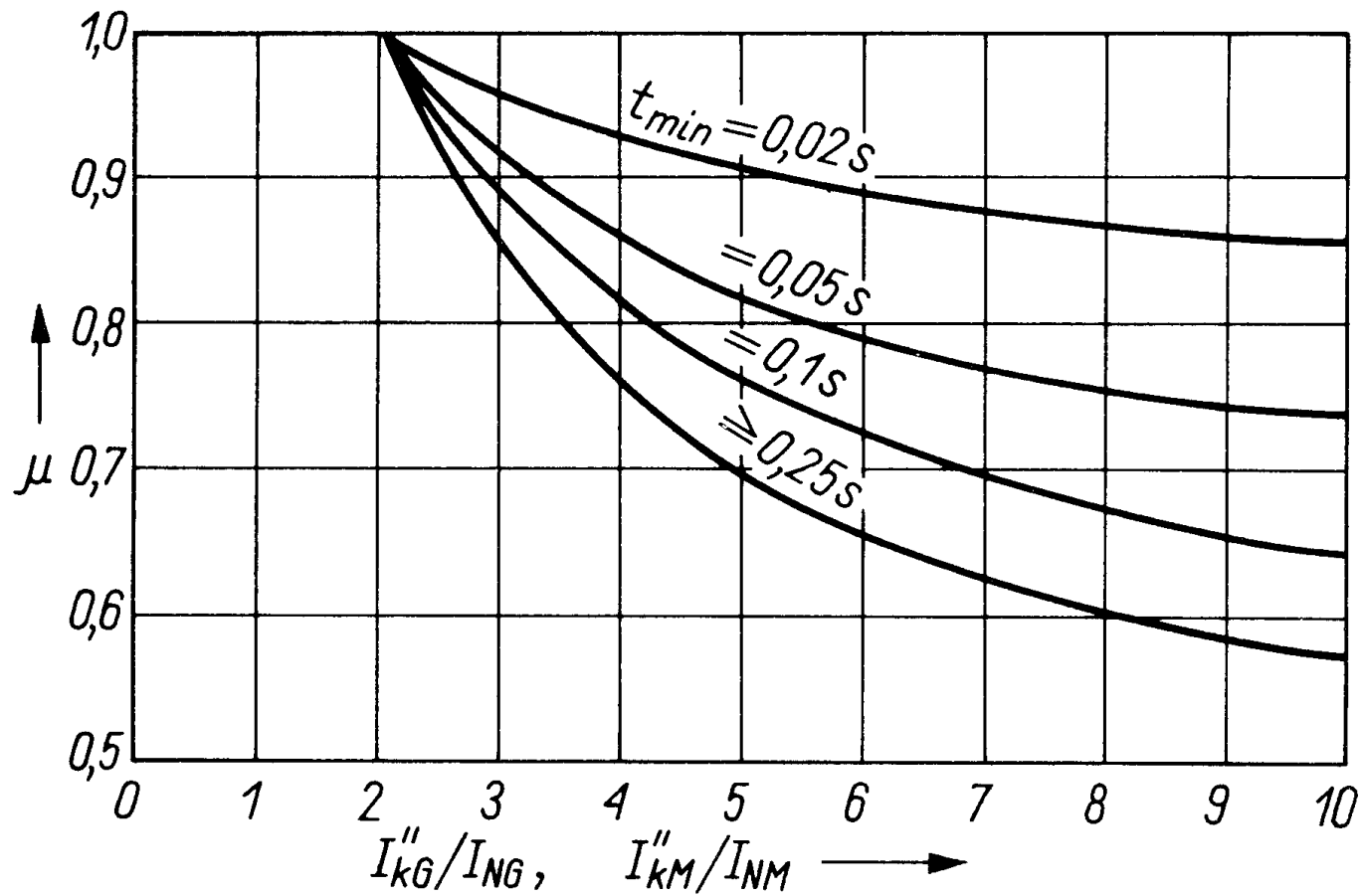
S''_{kQ} – moc zwarciowa w miejscu zwarcia wyznaczona bez udziału silników.

Wpływ silników na wartość prądu wyłączeniowego symetrycznego oblicza się według wzoru:

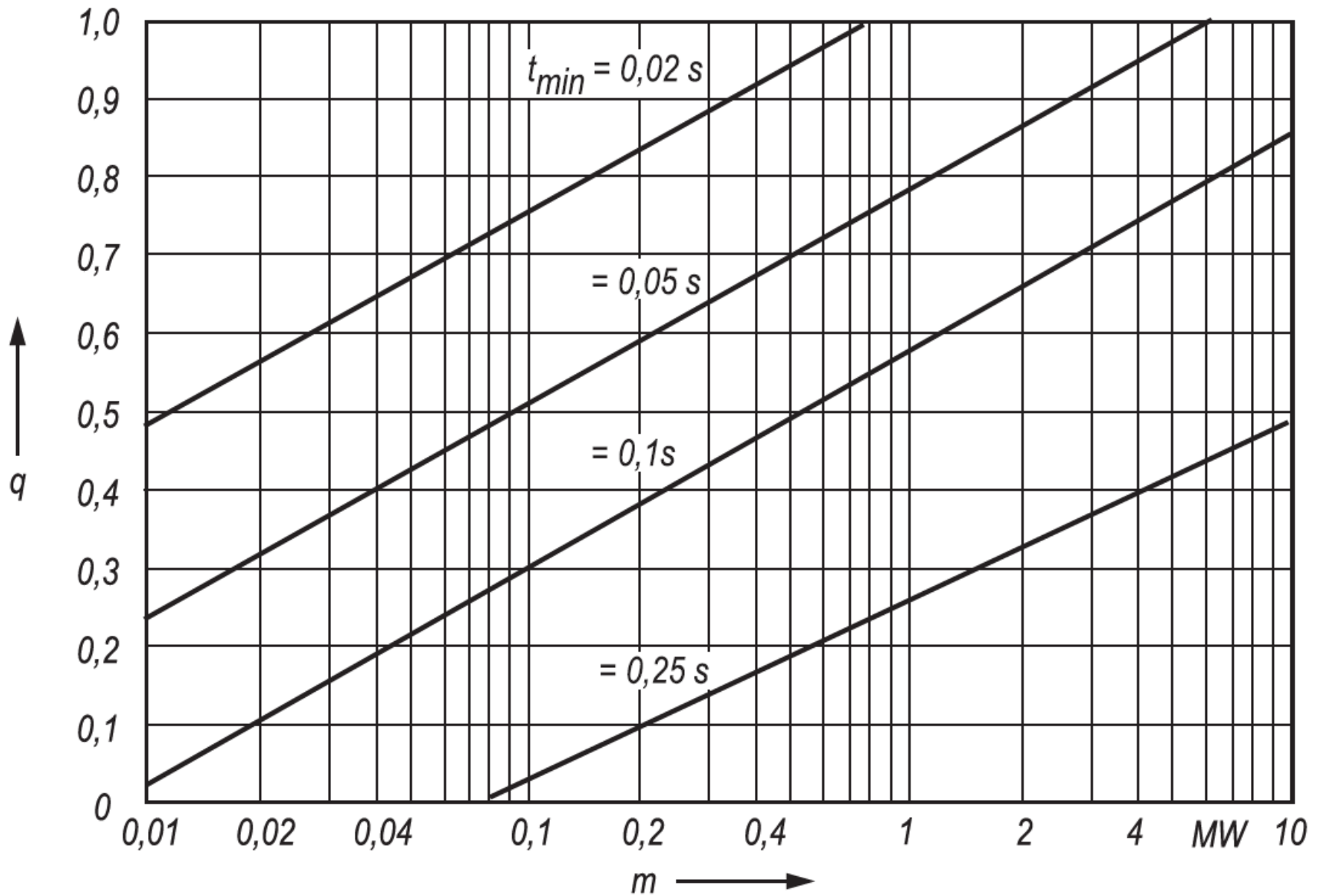
$$I_{bM} = \mu \cdot q \cdot I''_{kM}$$

w którym: μ , q – współczynniki uwzględniające zmniejszenie się składowej okresowej prądu wraz z czasem trwania zwarcia.

Ich wartości wyznacza się z poniższych wykresów.



Zależność współczynnika μ od czasu trwania zwarcia (t_{min}) oraz ilorazu prądu początkowego i prądu znamionowego generatora (I''_{kG}/I_{NG}) lub prądu znamionowego silnika (I''_{kM}/I_{NM})



Zależności współczynnika q od znamionowej mocy czynnej silnika przypadającej na jedną parę biegunów ($m = P/p$) oraz czasu t_{min} do otwarcia zestyków łącznika

W sieciach i instalacjach niskiego napięcia, szczególnie w przemysłowych, występuje zazwyczaj wiele silników o stosunkowo niewielkich mocach znamionowych, połączonych z szynami rozdzielnic przewodami i kablami różnej długości i o różnym przekroju żył.

Celem uproszczenia obliczeń grupę silników wraz z przewodami zasilającymi można zastąpić jednym silnikiem równoważnym $M4$ (rysunek na str. 90) o następujących parametrach:

- prąd znamionowy silnika I_{NM4} jest równy sumie prądów znamionowych wszystkich silników w grupie, przeliczonych na napięcie, przy którym wyznaczono prąd I_{kQ} ,
- impedancję Z_M należy obliczyć według wzoru (na str. 91) dla silnika o prądzie znamionowym $I_{NM} = I_{NM4}$,
- krotność prądu rozruchowego $k_r = 5$,
- moc przypadająca na jedną parę biegunów $m = 50$ kW,
- iloraz $R_M/X_M = 0,42$, czemu odpowiada $\kappa_M = 1,3$.

Przy zwarciu na szynach niskiego napięcia, np. w punkcie $F2$ (na rys. na str. 90), wpływ silników niskiego napięcia można pominąć, jeżeli jest spełniony warunek:

$$I_{nM4} \leq 0,01 I''_{kQ}$$

w którym I''_{kQ} – prąd początkowy przy zwarciu na szynach niskiego napięcia (w punkcie $F2$ na rysunku na str. 90), obliczony bez udziału silnika $M4$.

Obliczając prąd zwarciovowy przy zwarciu na szynach wysokiego napięcia, np. w miejscu $F1$ (na rysunku na str. 90), impedancję zastępczą grupy silników można wyznaczyć według wzoru (str. 91) przyjmując prąd znamionowy silnika I_{NM} równy prądowi znamionowemu transformatora $T3$ zasilającego rozdzielnicę niskiego napięcia, z której jest zasilany silnik zastępczy $M4$.

W przypadkach zwarć dwufazowych prąd początkowy silnika I''_{kM2} , prąd udarowy i_{pM2} oraz prąd symetryczny I_{bM2} są równe $\sqrt{3}/2$ odpowiednich prądów silnika przy zwarciu trójfazowym.

Ustalony prąd zwarciovowy I_{k2} jest natomiast równy $1/2$ prądu początkowego I''_{kM} , podczas gdy przy zwarciu trójfazowym przyjmuje się, że ustalony prąd zwarciovowy I_{kM} jest równy zeru.