

ZWARCIA W SIECIACH WN, SN i nN

Zwarcie - to nieprzewidziane, w danych warunkach eksploatacyjnych, połączenie bezpośrednie lub przez stosunkowo małą impedancję, punktów systemu elektroenergetycznego o różnych potencjałach, bądź jednego lub większej liczby takich punktów z ziemią.

PRZYCZYNY POWSTAWANIA ZWARĆ

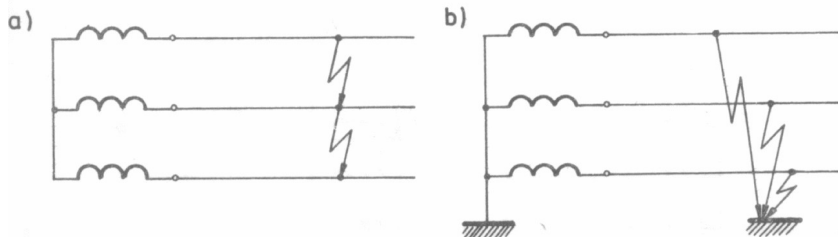
- ♦ elektryczne
- ♦ nielektryczne

SKUTKI PRZEPŁYWU PRĄDU ZWARCIOWEGO

- a) dynamiczne
- b) cieplne
- c) możliwość wypadnięcia z synchronizmu generatorów

PODZIAŁ ZWARĆ

- a) *symetryczne* - w których wszystkie fazy obciążone są symetrycznie takim samym prądem zwarciovym,



Rys. 2.1. Zwania symetryczne: a) trójfazowe bez ziemi, b) trójfazowe z ziemią

- b) *niesymetryczne* - w których fazy są obciążone niesymetrycznie prądem zwarciovym. Są to różnego rodzaju zwania dwu- i jednofazowe.

CEL OBLICZANIA PRĄDÓW ZWARCIOWYCH

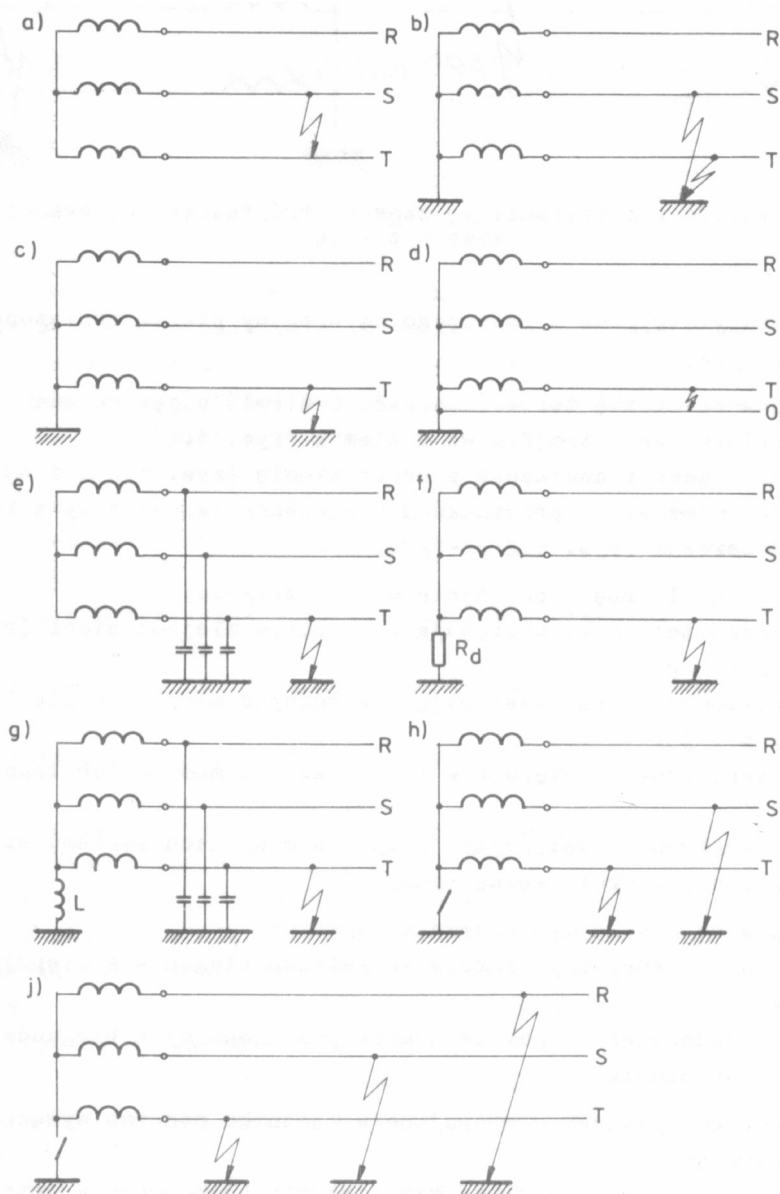
- 1) dobór urządzeń elektrycznych
- 2) weryfikacja lub poprawny dobór elementów toru prądowego
- 3) dobór lub określenie nastaw zabezpieczeń i automatyki elektroenergetycznej
- 4) weryfikacja istniejącej lub wykonanie skutecznej ochrony przeciwporażeniowej

Z podanych przyczyn, najistotniejsze są prądy zwarć trój- i jednofazowych w układach:

- a) o skutecznie uziemionym punkcie neutralnym (WN, nN - typu TN, TT)
- b) z izolowanym punkcie neutralnym (tj. SN - bez kompensacji; skompensowanych oraz uziemionych przez rezystor ograniczający oraz nN - typu IT)

NAJCZĘŚCIEJ WYSTĘPUJĄCE ZWARCIA W SIECIACH SN

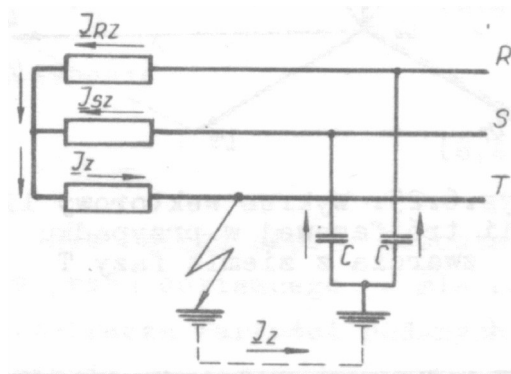
- | | |
|----------------------------|------|
| ♦ jednofazowe z ziemią | 65% |
| ♦ podwójne zwania z ziemią | 20%, |
| ♦ zwania dwufazowe | 10%, |
| ♦ zwania trójfazowe | 5%. |



Rys.5.2. Zwarcia niesymetryczne: a) zwarcie dwufazowe faz S i T, b) zwarcie dwufazowe z ziemią faz S i T, c) zwarcie jednofazowe z ziemią fazy T w sieci z bezpośrednio uzziemionym punktem zerowym, d) zwarcie jednofazowe fazy T z przewodem zerowym, e) zwarcie jednofazowe z ziemią fazy T w sieci z izolowanym punktem zerowym, f) zwarcie jednofazowe z ziemią fazy T w sieci z uzziemionym punktem zerowym przez rezystor R_d , g) zwarcie jednofazowe z ziemią fazy T w sieci kompensowanej dławikiem o indukcyjności L , h) podwójne zwarcie z ziemią (zwarcie jednofazowe z ziemią fazy S w jednym punkcie sieci i fazy T w innym punkcie sieci), j) potrójne zwarcie z ziemią

2.1. PRĄDY ZWARCIOWE W SIECIACH Z IZOLOWANYM PUNKTEM NEUTRALNYM (SN, IT)

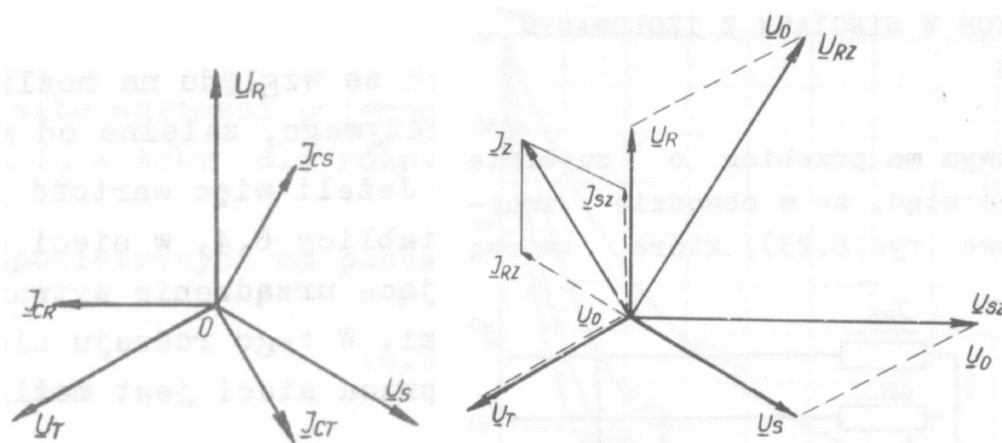
Podstawowa cecha prądu zwarciovego - prąd o charakterze pojemnościowym, płynący przez reaktancje pojemnościowe „zdrowych faz” z ziemią.



Rys. 2.3. Przebieg prądów zwarciovych w sieci trójfazowej z izolowanym punktem neutralnym

a)

b)



Rys. 2.4. Wykres wektorowy napięć i prądów w linii trójfazowej:
a) w stanie jałowym, b) w przypadku zwarcia z ziemią fazy T

Przed zwarcie z ziemią prądy pojemnościowe płynące w każdej z faz sieci wynoszą

$$I_C = I_{CR} = I_{CT} = I_{CS} = U_f \omega C_o \quad (2.1)$$

gdzie: U_f - napięcie fazowe,
 C_o - pojemność doziemna przewodów fazowych względem ziemi.

Po wystąpieniu zwarcia doziemnego w fazie T, w wyniku zmiany napięć fazowych, płynie prąd zwarciovowy I_Z

$$I_Z = I_{RZ} + I_{SZ} \quad (2.2)$$

Ponieważ prądy

$$I_{RZ} = I_{SZ} = U_f \sqrt{3} \omega C_o \quad (2.3)$$

a kąt pomiędzy nimi wynosi $\Pi/3$, stąd prąd zwarciovowy I_Z określa równanie

$$I_Z = 2 I_{RZ} \cos (\Pi / 6) = 2 U_f \sqrt{3} \omega C_o \frac{\sqrt{3}}{2} = 3 U_f \omega C_o = \sqrt{3} U_N \omega C_o \quad (2.4)$$

lub wzór postaci

$$I_Z = 3 I_C \quad (2.5)$$

gdzie: U_N - napięcie międzyprzewodowe sieci.

Ze wzorów (2.4), (2.5) wynika, że **prąd I_Z jest trzykrotną wartością prądu pojemnościowego płynącego do ziemi z każdego przewodu nieuszkodzonej linii i zależy od konfiguracji układu linii.**

Prąd jednofazowego zwarcia doziemnego może mieć charakter:

- a) przemijający,
b) trwały (szczególnie niebezpieczne są długotrwałe zwarcia łukowe).

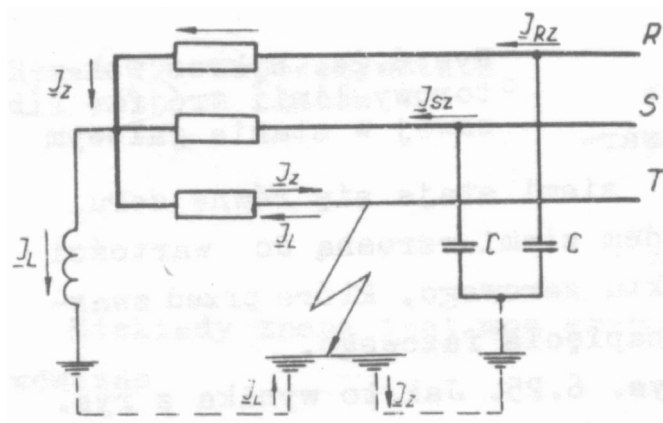
Prądy jednofazowego zwarcia doziemnego ogranicza się do wartości $5 \div 30$ A w liniach napowietrznych i napowietrzno-kablowych oraz 50 A w liniach kablowych - dla których zachodzi samozgaszenie łuku elektrycznego.

Tablica 1. Graniczne dopuszczalne wartości prądów ziemnozwarciowych w sieciach SN z izolowanym punktem neutralnym

Rodzaj linii	Napięcie znamionowe, kV				
	3÷6	10	15÷20	30÷40	60
Napowietrzne i napowietrzno-kablowe	30	20	15	10	5
Kablowe	50	50	50	50	50

Ograniczenie prądów zwarciovych realizuje się poprzez:

- ◆ kompensację pojemnościowego prądu zwarcia z ziemią sieci za pomocą:
 - 1) dławika gaszącego (tzw. cewki Petersena),
 - 2) transformatorów gaszących Baucha (w sieci SN, w której punkt neutralny jest niedostępny),
 - 3) transformatorów uziemiających o grupie połączeń Zy (pełniących także funkcję Tr potrzeb własnych - sposób obecnie coraz częściej stosowany),
- ◆ uziemienie punktu neutralnego sieci przez rezystancję.



Rys. 2.5. Przebieg prądów zwarciovych w linii trójfazowej z dławikiem gaszącym

Pełna kompensacja prądu zwarciovego wystąpi, gdy

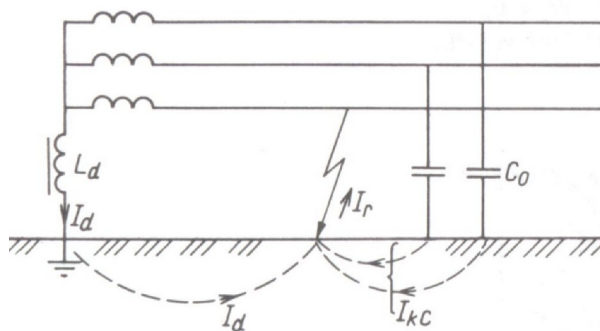
$$I_L = \frac{U_f}{\omega L} = I_Z = 3U_f \omega C_o \quad (2.5)$$

a indukcyjność L dławika będzie wynosić:

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C_o} \quad (2.6)$$

Sieć dla której spełniony jest warunek (2.6) nazywa się skompensowaną.

W rzeczywistych układach sieciowych prąd zwarcia doziemnego oprócz składowej pojemnościowej zawiera także składową czynną (I_{kr}) oraz wyższe harmoniczne (I_{wh}).



Rys. 2.6. Kompensacja prądu ziemnozwarciowego w rzeczywistym układzie sieciowym. I_r - prąd resztkowy, I_{kc} - prąd pojemnościowy, I_d - prąd dławika, L_d - indukcyjność dławika

Płynący prąd resztkowy, po kompensacji, opisuje zależność

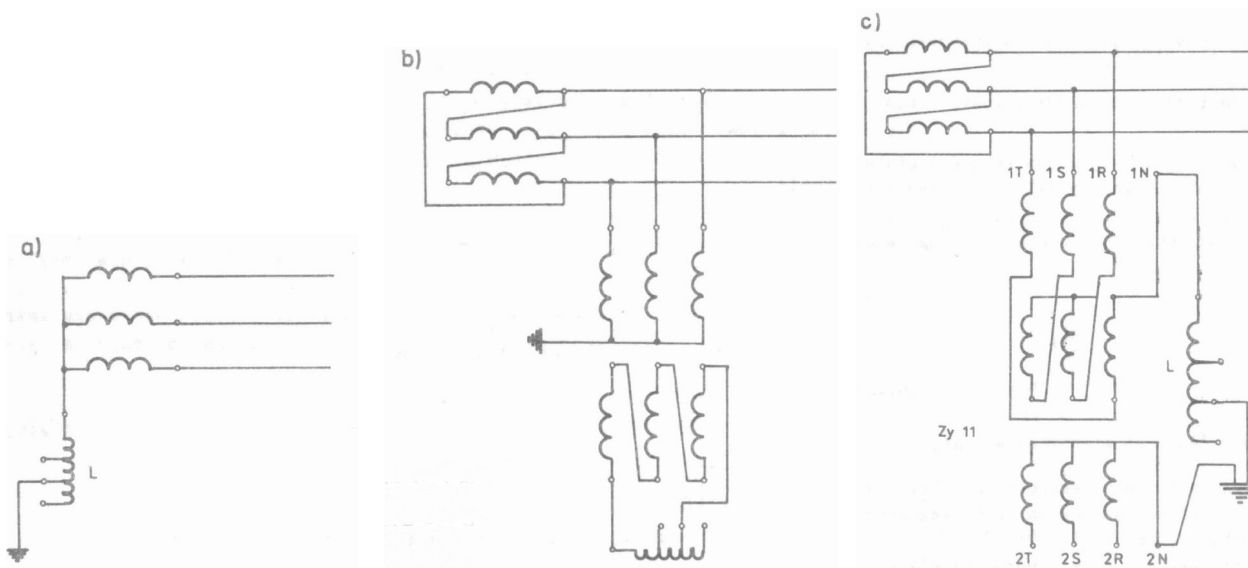
$$I_r = \sqrt{(I_d - I_{kc})^2 + I_{kr}^2 + I_{wh}^2} \quad (2.7)$$

w którym: I_{kr} - składowa czynna prądu ziemnozwarciowego,
 I_{wh} - wartość skuteczna wyższych harmonicznych prądu ziemnozwarciowego.

Stopień kompensacji prądu ziemnozwarciowego w sieci SN określa współczynnik rozstrojenia sieci (S) określony zależnością

$$S = \frac{I_d - I_{kc}}{I_{kc}} \cdot 100 \quad (2.8)$$

gdzie: I_d - suma prądów indukcyjnych urządzeń gaszących (dławików) przyłączonych do sieci. Współczynnik rozstrojenia (S) zawiera się w granicach od 5 do 15%.



Rys. 2.7. Kompensacja prądu ziemnozwarciowego pojemnościowego za pomocą:
a) cewki Petersena, b) transformatora Bauch, c) transformatora uziemiającego

Kompensacja prądu doziemnego przy pomocy dławików stosowna jest w sieciach napowietrznych i napowietrzno-kablowych.

W sieciach kablowych i kablowo-napowietrznych stosuje się uziemienie punktu neutralnego sieci przez rezystor (rezystor musi być tak dobrany, ażeby prąd zwarcowy był jak najmniejszy i gwarantował poprawne działanie zabezpieczeń przed skutkami zwarc z ziemią).

Uwaga! Wartość prądu zwarcia doziemnego można określić tylko poprzez pomiary.

5.2. CHARAKTERYSTYCZNE WIELKOŚCI PRĄDU ZWARCIOWEGO I ZASADY ICH OBLICZANIA

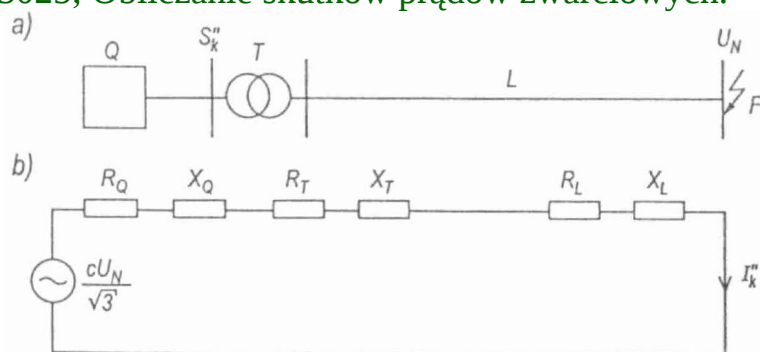
Uwagi:

1. W budowie schematu zastępczego obwodu zwarciego wykorzystuje się impedancje podłużne (tj. rezystancje i reaktancje) elementów układu elektrycznego odniesione do tego samego poziomu napięcia (zwykle napięcia zwarcia dla którego określa się charakterystyczne prądy zwarcie).

Dla zwarć symetrycznych są to impedancje dla składowej symetrycznej zgodnej (R_1, X_1), natomiast dla zwarć niesymetrycznych również impedancje dla składowej przeciwnej i zerowej (R_2, X_2, R_0, X_0).

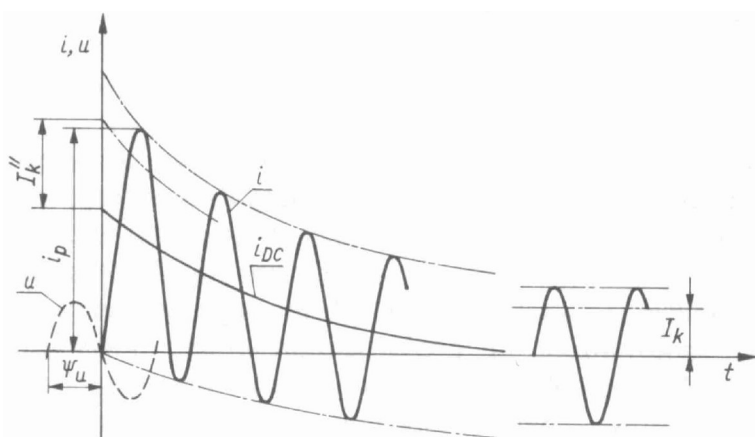
2. Obliczenia przeprowadza się wg norm:

- PN-EN 60909-0: 2002; Prądy zwarcie w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Część 0. Obliczanie prądów.
- PN-EN 60865-1:2002; Obliczanie skutków prądów zwarcieowych - Część I: Definicje i metody obliczania.
- PN-90 E-05025; Obliczanie skutków prądów zwarcieowych.



Rys. 5.7. Schemat układu elektroenergetycznego (a) oraz schemat zastępczy obwodu zwarciego do obliczeń prądu zwarciego przy zwarcu trójfazowym

Q - zastępcze źródło zasilania o mocy zwarcieowej S_k'' ; T - transformator;
L - linia elektroenergetyczna



Rys. 5.8. Stylizowany przebieg prądu zwarciego:

I_k'' - prąd zwarcieowy początkowy; I_k - ustalony prąd zwarcieowy; i_p - prąd udarowy;

i_{DC} - składowa nieokresowa prądu; u - napięcie; ψ_u - kąt fazowy napięcia w chwili wystąpienia zwarcia (na rysunku $\psi_u = \Pi, 0$)

Prąd zwarcieowy i jest sumą (rys. 5.14):

- ◆ składowej okresowej o pulsacji sieciowej (osiągającej max wartość $\sqrt{2} I_k''$ dla czasu trwania zwarcia $t_k = 0$, a po czasie ok. 0,1 s zmniejszającej się do wartości ustalonej równej $\sqrt{2} I_k$),
- ◆ składowej nieokresowej i_{DC} zależnej od kąta fazowego napięcia Ψ_u w chwili zwarcia. Składowa ta jest największa (równa składowej okresowej, lecz o przeciwnym znaku) dla $\Psi_u = 0$ lub Π w obwodzie, w którym $X \gg R$ (rys. 5.8).

W zależności od miejsca zwarcia oraz relacji pomiędzy składowymi I_k'' i I_k , rozróżnia się (rys. 5.15):

- ◆ zwarcia odległe od generatorów - dla których $I_k'' = I_k$,
- ◆ zwarcia w pobliżu generatorów, w których składowa okresowa prądu zwarciovego ma amplitudę o malejącej wartości od $\sqrt{2} I_k''$ do $\sqrt{2} I_k$.

Charakterystyczne wielkości zwarciovie i sposoby ich obliczania

- 1) *Prąd zwarciovowy początkowy* I_k'' - wartość skuteczna składowej okresowej prądu zwarciovego w chwili powstania zwarcia (tj. $t_k = 0$).

Dla zwarcia trójfazowego prąd I_k'' obliczany jest ze wzoru

$$I_k'' = \frac{c U_N}{\sqrt{3} Z_k} \quad (5.7)$$

w którym:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (5.8)$$

oraz: c - współczynnik napięciowy (Tablica 5.1); Z_k - impedancja obwodu zwarciovego; R_k , X_k - rezystancja i reaktancja obwodu zwarciovego; U_N - znamionowe napięcie międzyprzewodowe przy którym zachodzi zwarcie. Rezystancję R_k można pominąć, gdy $R_k \leq 0,3 X_k$.

Tablica 5.1. Wartości współczynników c

Napięcie znamionowe U_N	Wartość współczynnika c do obliczania prądu zwarciovego	
	największego	najmniejszego
Niskie, do 1000 V: — 230/400 V — inne napięcia	1,00 1,05	0,95 1,00
Wysokie, ponad 1 kV	1,10	1,00

- 2) *Prąd zwarciovowy ustalony* I_k - wartość skuteczna składowej okresowej prądu zwarciovego po zaniku składowych okresowych przejściowych prądu zwarciovego.
- 3) *Prąd zwarciovowy nieokresowy* i_{DC} - składowa nieokresowa prądu zwarciovego. Prąd ten wyznacza się z zależności

$$i_{DC} = \sqrt{2} I_k'' e^{-\frac{R_k}{L_k} t} \quad (5.9)$$

w której: t - czas liczony od chwili wystąpienia zwarcia; R_k , L_k - rezystancja i indukcyjność obwodu zwarciovego.

W przypadku, gdy $X_k \ll R_k$, prąd i_{DC} osiąga max. dla $\Psi_u = 0$ lub Π .

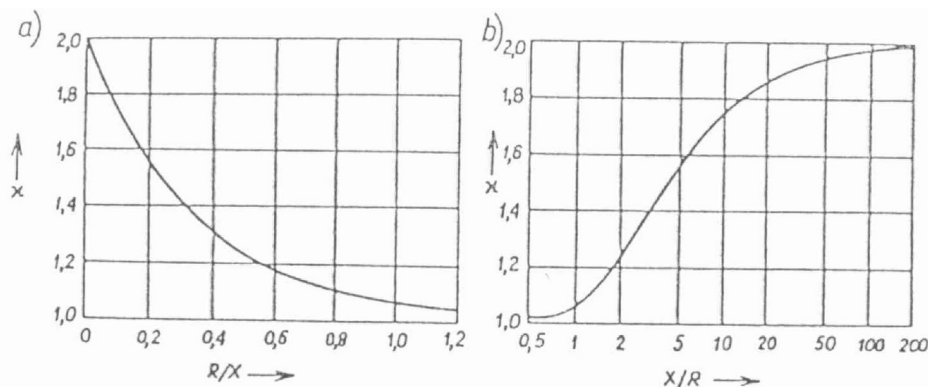
- 4) *Prąd udarowy* i_p - największa chwilowa wartość prądu zwarciovego. Prąd ten oblicza się ze wzoru

$$i_p = \sqrt{2} \chi I_k'' \quad (5.10)$$

w którym: χ - współczynnik udaru zależny od ilorazu rezystancji R_k i reaktancji X_k obwodu zwarciovego obliczony z zależności

$$\chi = 1,02 + 0,98 e^{-3R_k / X_k} \quad (5.11)$$

lub odczytany z jednego z wykresów podanych na rys. 5.9.



Rys. 5.9. Zależność współczynnika udaru χ od wartości R_k/X_k (a) oraz X_k/R_k (b)

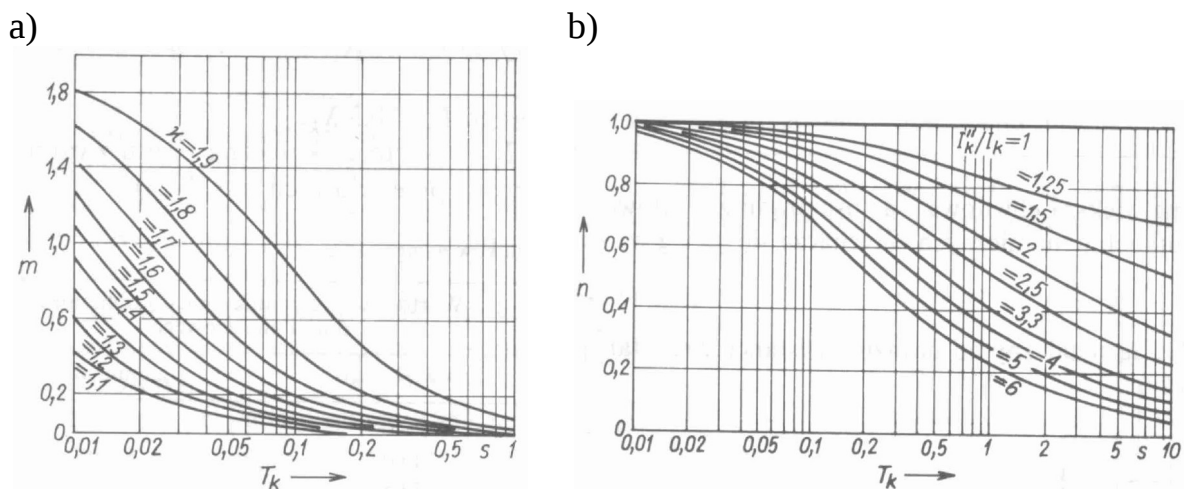
- 5) **Prąd zwarciový ciepłny** I_{th} - prąd zastępczy o stałej wartości skutecznej, który w czasie trwania zwarcia T_k wydzieli taką samą ilość ciepła jak rzeczywiście płynący prąd zwarciový. Wyznaczany jest z zależności

$$I_{th} = I_k'' \sqrt{m^2 + n^2} \quad (5.12)$$

w której: współczynniki m i n uwzględniają odpowiednio wpływ ciepłny składowej nieokresowej i okresowej prądu zwarciovego.

Współczynnik:

- a) $m = f(T_k; \chi)$ odczytuje się z wykresu podanego na rys. 5.10a (dla χ z rys. 5.9),
 b) $n = f(T_k; I_k'' / I_k)$ - z wykresu podanego na rys. 5.10b. Dla zwarć odległych przyjmuje się $n = 1$



Rys. 5.10. Współczynniki do określania zastępczego prądu ciepłego I_{th} uwzględniające wpływ: a) m - składowej nieokresowej; b) n - składowej okresowej

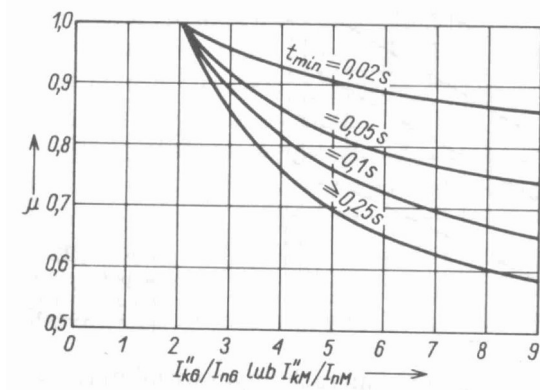
T_k - czas trwania zwarcia; χ - współczynnik udaru;

I_k'' - prąd początkowy; I_k - ustalony prąd zwarciový

- 6) **Prąd wyłączeniowy symetryczny** I_b - wartość skuteczna jednego pełnego okresu prądu zwarciovego w chwili t_{min} rozdzielenia się styków pierwszego bieguna łącznika wyłączającego zwarcie. Prąd ten oblicza się z zależności

$$I_b = \mu I_k'' \quad (5.13)$$

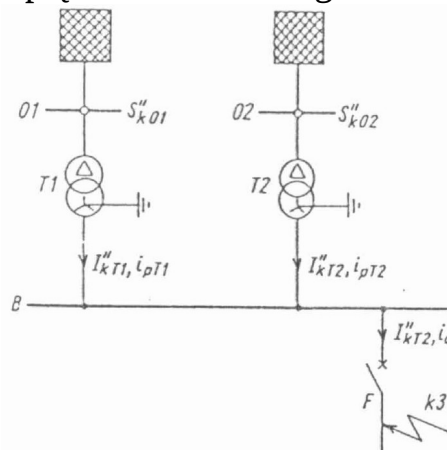
w której współczynnik μ uwzględniający zmniejszenie się składowej okresowej I_k'' prądu zwarciovego odczytuje się z wykresu podanego na rys. 5.11.



Rys. 5.11. Zależność współczynnika μ od stosunku I_{kG}'' / I_{nG} lub I_{kM}'' / I_{nM} . I_{kG}'' , I_{kM}'' - prądy początkowe generatorów lub silników; I_{nG} , I_{nM} - sumy prądów znamionowych generatorów lub silników pracujących na zwarcie (przeliczone na to samo napięcie dla którego określano wartości prądów

I_k'')

7) Moc zwarciovą S_k'' - wartość fizykalna zdefiniowana jako iloczyn prądu zwarciovego I_k'' , napięcia znamionowego sieci U_N i współczynnika $\sqrt{3}$.



Rys. 5.12. Obliczanie prądu zwarciovego dla zwarcia w pkt. F zasilanego z dwóch niezależnych źródeł (

$$I_k'' = I_{kT1}'' + I_{kT2}''; \quad i_p = i_{pT1} + i_{pT2} \quad)$$

Źródłami prądu zwarciovego mogą być: generatory; silniki synchroniczne i kompensatory (traktowane tak samo jak generatory synchroniczne) oraz silniki indukcyjne.

SILNIKI INDUKCYJNE

W przypadku zwarcia symetrycznego silniki indukcyjne (asynchroniczne) wpływają na wartość prądu:

- ♦ początkowego I_k'' ,
- ♦ udarowego i_p ,
- ♦ wyłączeniowego symetrycznego I_b .

W przypadku zwarcia niesymetrycznego, należy uwzględnić również wpływ silników indukcyjnych na ustalony prąd zwarciovą I_k .

Prąd zwarciovą I_{kM} silników indukcyjnych wyznacza się ze wzoru

$$I''_{KM} = \frac{C U_{nM}}{\sqrt{3} (Z_M + Z_P)} \quad (5.14)$$

gdzie:

Z_M - impedancja silnika,

Z_P - impedancja obwodu między silnikiem a miejscem zwarcia.

Impedancję silnika oblicza się z zależności

$$Z_M = \frac{U_{nM}^2}{k_r S_{nM}} \quad (5.15)$$

w której

$$S_{nM} = \frac{P_{nM}}{\eta_n \cos \varphi_n} \quad (5.16)$$

$$k_r = \frac{I_{lM}}{I_{nM}} \quad (5.17)$$

gdzie: P_{nM}, S_{nM} - odpowiednio znamionowa moc czynna i pozorna silnika;

$\eta_n, \cos \varphi_n$ - sprawność i znamionowy współczynnik mocy silnika,

k_r - iloraz prądu rozruchowego I_{lM} do prądu znamionowego I_{nM} .

W przypadku połączenia silnika lub grupy silników z miejscem zwarcia krótką linią kablową lub bezpośredniego ich przyłączenia z miejscem zwarcia prąd zwarciaowy I''_{KM} określa się ze wzoru

$$I''_{KM} \approx k_r C I_{nM} \quad (5.18)$$

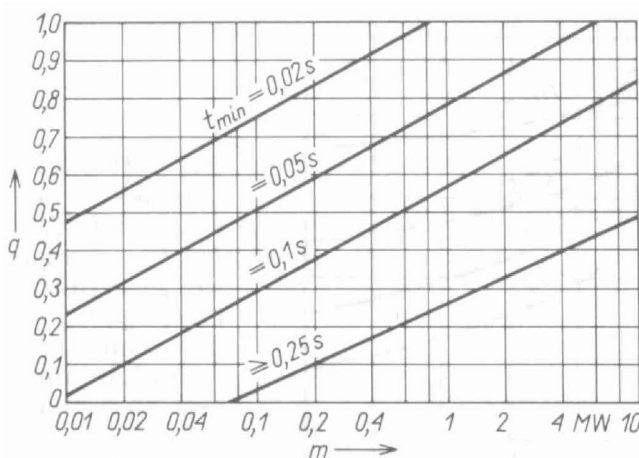
Prąd udarowy i_{pM} silników oblicza się ze wzoru (5.10) przyjmując współczynnik udaru χ_M dla silników:

- ◆ wysokiego napięcia - 1,65, gdy moc znamionowa silnika odniesiona do jednej pary biegunów jest mniejsza od 1 MW oraz 1,75 gdy jest większa od 1 MW,
- ◆ niskiego napięcia - $\chi_M \approx 1,3$.

Prąd wyłączeniowy silnika lub grupy silników oblicza się wg wzoru

$$I_{bM} = \mu q I''_{KM} \quad (5.19)$$

gdzie: μ i q - współczynniki odczytuje się z wykresów podanych na rys. 5.11 i 5.13



Rys. 5.13. Zależność współczynnika q od mocy czynnej silnika na jedną parę biegunów m

Wpływ silników na prądy zwarciaowe można pominąć gdy:

- ◆ suma prądów znamionowych silników jest mniejsza od 0,01 prądu zwarciaowego początkowego wyznaczonego dla zwarcia bez

udziału silników,

- ◆ silniki przyłączone są do sieci publicznej nN.

KOLEJNOŚĆ I SPOSÓB OBLICZANIA

- Bazą wyjściową do obliczeń charakterystycznych wielkości zwarciovych, jest:
- znajomość mocy zwarciovej S_K'' w miejscu przyłączenia odbiorcy do systemu elektroenergetycznego,
 - poprawnie wykonany, dla analizowanego rodzaju zwarcia, schemat obwodu zwarciovej,
 - poprawnie obliczone parametry zastępcze elementów obwodu zwarciovej,
 - właściwie określona impedancja obwodu zwarciovej.

Parametry systemu elektroenergetycznego (określone z mocy zwarciovej S_K''), impedancję urządzeń elektroenergetycznych (transformatorów, urządzeń sieci...) oraz parametry elementów toru prądowego (kable elektroenergetycznych, szynoprzewodów, przewodów instalacyjnych, itd. odczytane z danych katalogowych producentów) obwodu zwarciovej, określane są dla ich parametrów znamionowych i muszą być transformowane na poziom napięcia zwarcia.

W budowie schematu zastępczego obwodu zwarciovej wykorzystuje się impedancje podłużne (tj. rezystancje i reaktancje) elementów układu elektrycznego odniesione do tego samego poziomu napięcia (zwykle napięcia zwarcia).

Dla zwarć symetrycznych są to impedancje dla składowej symetrycznej zgodnej (R_1, X_1), natomiast dla zwarć niesymetrycznych również impedancje dla składowej przeciwnej i zerowej (R_2, X_2, R_0, X_0).

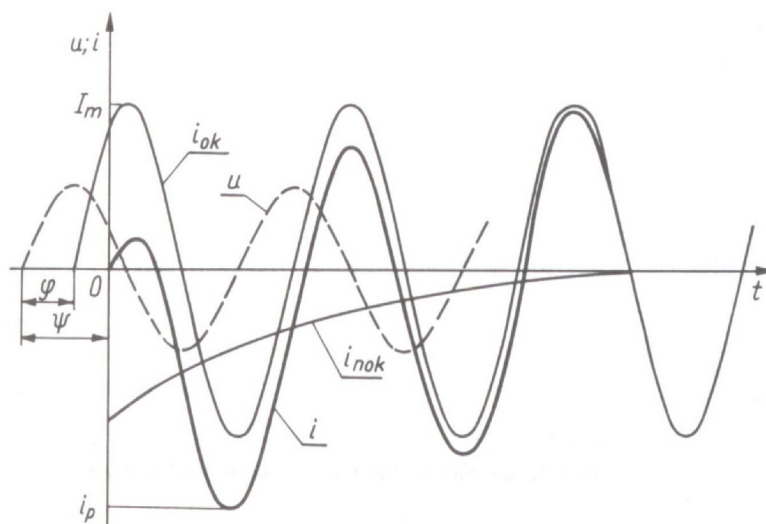
Dla znanej, w miejscu przyłączenia odbiorcy do systemu elektroenergetycznego mocy zwarciovej S_K'' , parametry zastępcze sytemu (Z_S, X_S, R_S - odpowiednio impedancje, reaktancję i rezystancję) oblicza się ze wzorów:

$$Z_S = \frac{c U_N^2}{S_K''}$$

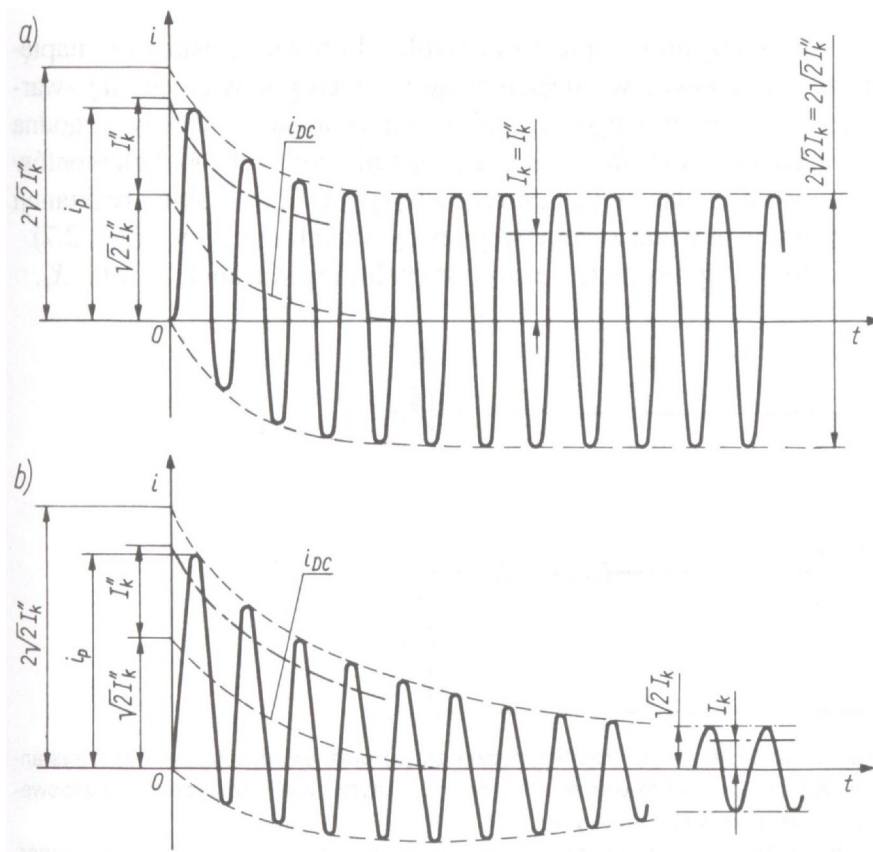
(5.20)

$$X_S = 0,995 Z_S \quad (5.21)$$

$$R_S = 0,1 X_S \quad (5.22)$$



Rys. 5.14. Przebieg czasowy prądu zwarciovej "i": i_{ok} - składowa okresowa, i_{nok} - składowa nieokresowa, i_p - prąd udarowy, u - napięcie zasilające



Rys. 5.15. Przebiegi prądu zwarciovego przy zwarcu:
a) odległym od źródła zasilania, b) w pobliżu źródła zasilania (generatora)