

Należy tu dodatkowo wyjaśnić, że zwłaszcza w przypadku takich aparatów jak łączniki, obliczeniowe dokładne wyznaczenie wymiarów ich toru prądowego dla zadanej obciążalności prądowej ciąglej napotyka na bardzo istotne trudności. Związane są one z koniecznym, a skądinąd częstokroć bardzo złożonym, kształtowaniem takich torów prądowych, a zwłaszcza zestyków łączników. To z kolei stwarza trudności w rozwiązywaniu równań bilansu cieplnego typu (1.7) wobec powszechnego braku informacji na temat zapisu poszczególnych funkcji wchodzących do tego równania. Każda bowiem konkretna konstrukcja toru prądowego wymagałaby żmudnego wyznaczania współczynników oddawania ciepła i współczynników wyznaczających wartość ciepła wytworzonego i innych koniecznych informacji dodatkowych. Stąd też nie korzysta się zwykle z takiej drogi postępowania porzeczając na przeprowadzeniu obliczeń przybliżonych, z których najdokładniejsze dotyczyć będą dostatecznie długich części toru prądowego o regularnym kształcie przekroju. Tak opracowana konstrukcja jest następnie sprawdzana doświadczalnie drogą przeprowadzenia próby nagrzewania prądem ciągłym o zadanej wartości i rodzaju (tj. prądem zmiennym lub stałym). Próby takie przeprowadza się np. w przypadku prądu zmiennego przy użyciu specjalnych transformatorów prądowych o mocy rzędu 500 VA - 50 kVA przystosowanych do pracy przy zwartym badanym torem prądowym uzwojeniu probierczym. W czasie próby nagrzewania mierzy się przyrosty temperatur poszczególnych części toru prądowego i porównuje je z wartościami przyrostów dopuszczalnych (tablica 6).

1.3. Obciążalność zwarciova cieplna i elektrodynamiczna torów prądowych i aparatów (z pominięciem obciążalności prądowej zestyków)

1.3.1. Prądy zwarciove (zmienne)

1.3.1.1. Ogólna charakterystyka przebiegu prądu zwarciovego i definicje

Prąd zwarciovy jest to prąd spowodowany przez zwarcie metaliczne lub przez łuk elektryczny w obwodzie elektrycznym. Prąd zwarciovy zawiera w ogólnym przypadku dwie składowe:

- okresową zmienną (wymuszoną),
- nieokresową (swobodną jednokierunkową).

W nieobciążonym przed zwarciem obwodzie jednofazowym z rys.1.6a prąd zwarciový można zapisać wzorem

$$i_{zw} = i_{ok} + i_{no} = I_m \cos(\omega t + \alpha) - I_m e^{-t/T} \cos \alpha =$$

$$= I_m \left[\cos(\omega t + \alpha) - e^{-t/T} \cos \alpha \right], \quad (1.18)$$

gdzie

i_{ok} - wartość chwilowa składowej nieokresowej prądu zwarciový,

i_{no} - wartość chwilowa składowej nieokresowej prądu zwarciový,

$$I_m = \frac{E_m}{Z},$$

$\alpha = \psi - \varphi$ - faza składowej okresowej prądu zwarciový w chwili zwarcia $t = 0_+$ = faza początkowa prądu zwarciový,

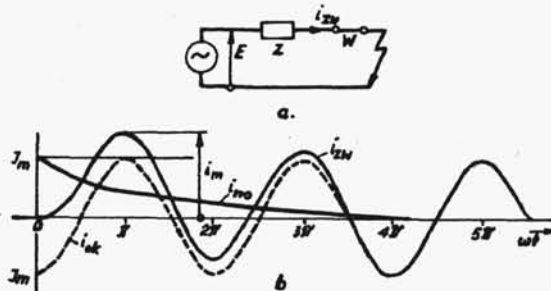
$\varphi = \arctg \frac{x}{R}$, kąt opóźnienia składowej okresowej prądu zwarciový względem SEM bezoporowego źródła prądu,

ψ - faza SEM bezimpedancyjnego źródła napięcia $e = E_m \cos(\omega t + \psi)$ w chwili zwarcia $t = 0_-$ = faza początkowa SEM (lub napięcia),

$T = \frac{L}{R} = \frac{x}{\omega R} = \frac{\tan \varphi}{\omega}$ - stała czasowa składowej nieokresowej prądu zwarciový.

Wyróżniamy trzy przypadki szczególne przebiegu w czasie prądu zwarciový:

1. Przebieg prądu zwarciový symetrycznego, jeśli w chwili $t = 0_+$:



Rys.1.6. Przebieg prądu zwarciový w obwodzie jednofazowym (faza początkowa prądu $\alpha = -\pi$)

$$\alpha = \psi - \varphi = (n + \frac{1}{2})\pi,$$

gdzie $n = 0, 1, 2, \dots$

2. Przebieg prądu zwarciovego o maksymalnej asymetrii, jeśli w chwili $t = 0_+$

$$\alpha = \psi - \varphi = n\pi$$

3. Przebieg prądu zwarciovego, przy którym występuje prąd udarowy, jeśli w chwili $t = 0_-$

$$\psi = \alpha + \varphi = (n + \frac{1}{2})\pi.$$

W tym ostatnim przypadku rozumiemy za rozważaniami w podręczniku (s.89 i aneks I) prąd udarowy, jako największą wartość szczytową prądu zwarciovego występującego w określonym obwodzie zwarciovym przy zwarciu powstałym w chwili przejścia SEM (lub napięcia) przez wartość zerową, tj. przy założeniu

$$\psi = \alpha + \varphi = (n + \frac{1}{2})\pi.$$

Prąd udarowy w sposób przybliżony, lecz dokładniejszy można określić ze wzoru

$$i_u = k'_u I_m \cong I_m \left[1 + \sin \varphi e^{-(\varphi + \frac{\pi}{2})/\omega T} \right] \quad (1.19a)$$

lub w sposób przybliżony jako

$$i_u = k_u I_m = I_m (1 + e^{\pi/\omega T}). \quad (1.19b)$$

Pozostałe definicje związane z przebiegiem czasowym prądu zwarciovego (rys.1.7) są następujące (wg PN/E-05002):

- Składowa okresowa I_{ok} prądu zwarciovego jest to składowa oscylująca okresowo względem osi czasowej o amplitudzie stałej w czasie, lub malejącej z biegiem czasu. Wartość tej składowej w dowolnej chwili określa się jej wartością skuteczną

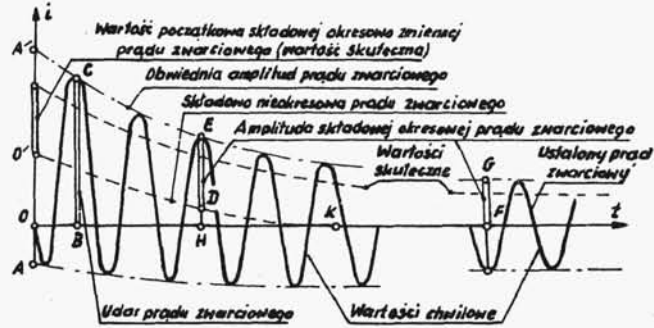
obliczaną jako iloraz amplitudy tej składowej w danej chwili przez $\sqrt{2}$.

- Początkowa wartość składowej okresowej I_p prądu zwarcowego jest to wartość skuteczna składowej okresowej w chwili początkowej zwarcia, tj. w chwili $t=0_+$.

- Składowa nieokresowa i_{no} prądu zwarcowego jest to składowa nie zmieniająca znaku w czasie jednego zwarcia i malejąca z biegiem czasu. Wartość składowej nieokresowej w dowolnej chwili określa się jej wartością chwilową w danej chwili.

- Prąd zwarcowy symetryczny $I_S = I_{ok}$ jest to prąd zwarcowy zawierający tylko składową okresową.

- Prąd zwarcowy niesymetryczny I_{nS} jest to prąd zwarcowy zawierający obydwie składowe: okresową i nieokresową. Wartość prądu niesymetrycznego określa się wartością skuteczną określoną wg wzoru



Rys.1.7. Przebieg przejściowy prądu zwarcowego w jednej fazie obwodu zwarcowego

$$I_{nS} = \sqrt{I_{ok}^2 + i_{no}^2} \quad (1.20)$$

Spośród zwarc w obwodach prądu zmiennego interesują nas szczególnie zwarcia w obwodach trójfazowych.

Wartości początkowe składowych okresowych dla poszczególnych rodzajów zwarc tj. jedno-, dwu- i trójfazowych w tych obwodach przy założeniu:

- braku oporności czynnych w obwodzie,
- związania wektora E z osią rzeczywistą, wyrażone są związkami:

$$\left. \begin{aligned} \hat{I}_p^I &= -j \frac{3 E}{X_{00} + X_{11}'' + X_{22}} \cong -j \frac{3 \hat{E}}{X_{00} + 2X_{11}''} \\ I_p^{II} &= \pm \frac{\sqrt{3} E}{X_{11}'' + X_{22}} \cong \pm \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\hat{E}}{X_{11}''} , \\ \hat{I}_p^{III} &= -j \frac{\hat{E}}{X_{11}''} , \end{aligned} \right\} (1.21)$$

gdzie X_{00} - reaktancja dla składowej kolejności zerowej prądu zwarciovego,
 X_{11}'' - reaktancja początkowa dla składowej kolejności zgodnej prądu zwarciovego,
 X_{22} - reaktancja dla składowej kolejności przeciwnej prądu zwarciovego,
 \hat{E} - wartość skuteczna fazowej SEM bezimpedancyjnego źródła napięcia, lub też fazowego napięcia występującego pomiędzy zwierzanymi zaciskami rozpatrywanej gałęzi obwodu, przed zwarcieniem zacisków tej gałęzi.

W sieciach wysokiego napięcia zazwyczaj

$$X_{22} \geq X_{11}''$$

oraz
$$X_{11}'' < X_{00} \leq 3X_{11}''$$

(w sieciach z uziemionym skutecznie punktem zerowym).

Wobec tego w większości przypadków

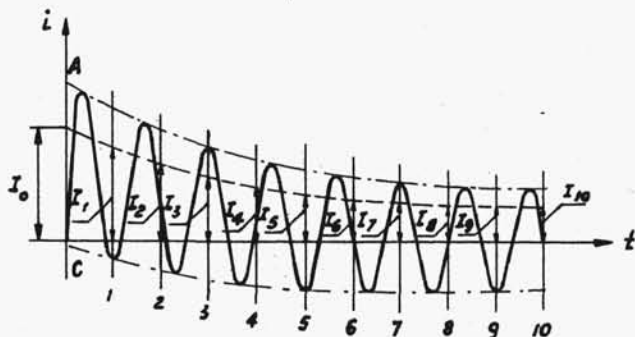
$$I_p^{III} \geq I_p^I > I_p^{II} ,$$

tj.

$$i_u^{III} \geq i_u^I > i_u^{II} .$$

Prądy zwarciove przepływając przez tory prądowe wyodrębnione, czy też tory prądowe aparatów powodują powstawanie sił elektrodynamicznych oddziaływujących na te tory i ich gwałtowne, krótkotrwałe nagrzewania. Obliczanie tych obciążeń będzie przedmiotem dalszej części niniejszego opracowania. Obecnie wspomnimy, że wartość sił elektrodynamicznych jest m.in. wyznaczona największą chwilową wartością powodującego je prądu

zwarciovego, natomiast stopień obciążenia zwarciovego cieplnego toru prądowego zależy od wydzielonej w czasie przepływu prądu zwarciovego ilości ciepła. Różne w poszczególnych charakterystycznych przypadkach zwa-



Rys.1.8. Wyznaczanie wartości zastępczej I_z prądu krótkotrwałego

zanikanie składowych prądu zwarciovego ewentualnie modyfikowane forsowaniem wzbudzenia generatorów spowodowało konieczność wprowadzenia zastępczych współczynników obliczeniowych umożliwiających ilościowe ujęcie skutku cieplnego prądu zwarciovego. Będzie o tym mowa w punkcie 1.3.2. w dalszym ciągu tekstu. Obecnie pragniemy jedynie przytoczyć metodę wyznaczania wartości zastępczej skutecznej I_z prądu krótkotrwałego podczas próby prądem zwarciowym n-sekundowym aparatów elektrycznych (wg PN-64/E-06100).

Na rys.1.8 przedstawiono typowy przebieg prądu zwarciovego zawierającego składową okresową oraz zanikającą składową nieokresową.

W celu wyznaczenia wartości I_z należy podzielić okres trwania zwarcia t na 10 równych części i wyznaczyć wartości skuteczne prądów I w chwilach 0,1 ... 10 wg wzoru (1.20) tj.

$$I = \sqrt{I_{ok}^2 + i_{no}^2}.$$

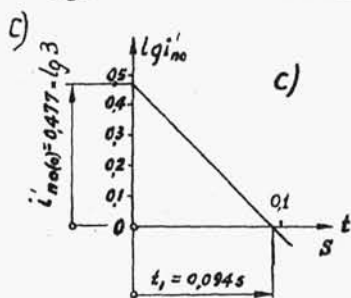
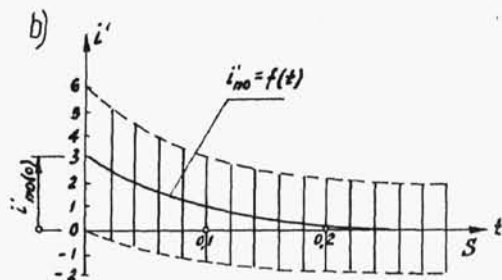
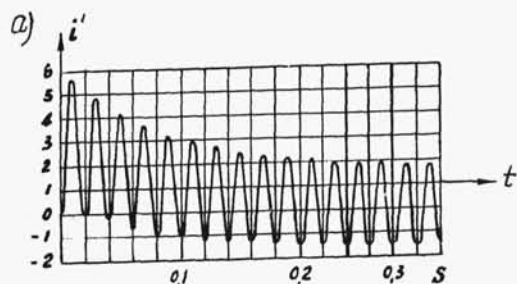
Wartość I_z należy obliczyć wg wzoru (tzw. wzoru SIMPSONa)

$$I_z = \sqrt{\frac{1}{30} [I_0^2 + 4(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2) + 2(I_2^2 + I_4^2 + I_6^2 + I_8^2) + I_{10}^2]} \quad (1.22)$$

w którym $I_0, I_1 \dots I_9, I_{10}$ oznaczają wartości skuteczne prądu w chwilach 0, 1 ... 9, 10.

1.3.1.2. Przykłady liczbowe

A. Na rys.1.9a podano oscylogram prądu zwarciovego otrzymany przy zwarcu zewnętrznym turboprądnicy. Należy na jego



Rys.1.9. Do przykładu liczbowego (pkt. 1.3.1.2)

podstawie wyznaczyć wartość początkową składowej okresowej prądu zwarciovego i stałą czasową zanikania składowej nieokresowej. Wartości prądu podano w jednostkach względnych^x i oznaczono symbolami z indeksami.

Rozwiązywanie zadania rozpoczynamy od wyrysowania obwiednich zadanej krzywej zmienności prądu. Dzielimy odcinki rzędnych między obwiedniami na połowy otrzymując tą drogą punkty przebiegu składowej nieokresowej (rys.1.9b).

Dla określenia stałej czasowej jej zanikania z większą dokładnością wykreślamy powtórnie jej początkowy fragment w skali logarytmiczno-liniowej (rys.1.9c).

^x) tj. uzyskanych przez podzielenie wartości rzeczywistych prądu przez wartości przyjętej jednostki prądu, np. k [kA]

sać możemy

$$i'_{no} = i'_{no(0)} e^{-t/T}$$

W naszym przypadku wartości $i'_{no} = 1$ odpowiada z wykresu (rys.1.9b) czas $t_1 = 0,094s$, zaś dla $t = 0$; $\lg i'_{no(0)} = 0,477$.

Mamy zatem

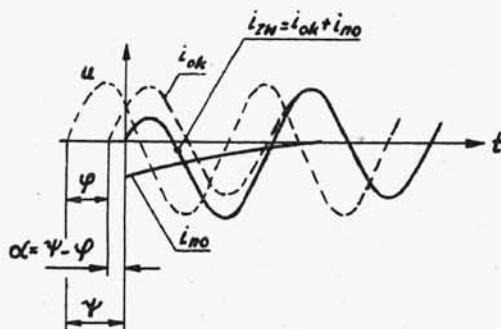
$$i' = i'_{no(0)} e^{-t_1/T}$$

skąd

$$T = t_1 \frac{\lg e}{\lg i'_{no(0)}} = 0,094s \cdot \frac{0,434}{0,477} = 0,086 s.$$

Ponieważ $\lg i'_{no(0)} = 0,477$, $i'_{no(0)} = 3$, tj. mamy do czynienia z przypadkiem przebiegu prądu zwarciovego o maksymalnej asymetrii. Wartość początkowa składowej okresowej zgodnie z definicją wg rys.1.7 wynosi $I'_p = \frac{3}{\sqrt{2}}$.

B. Wyznaczyć wartości początkowe składowych nieokresowych w poszczególnych fazach układu trójfazowego przy symetrycznym jednoczesnym zwarciu trójfazowym w założeniu, że wartość maksymalna składowej okresowej $I_m = 1$ (w jednostkach względnych). Faza początkowa składowej okresowej prądu zwarciovego w fazie A, $\alpha = \psi - \varphi = 60^\circ$ przy $\varphi \cong 90^\circ$ (wg rys.1.10).



rys.1.10. Charakterystyczne kąty (fazy) przebiegu prądu zwarciovego w wybranej fazie