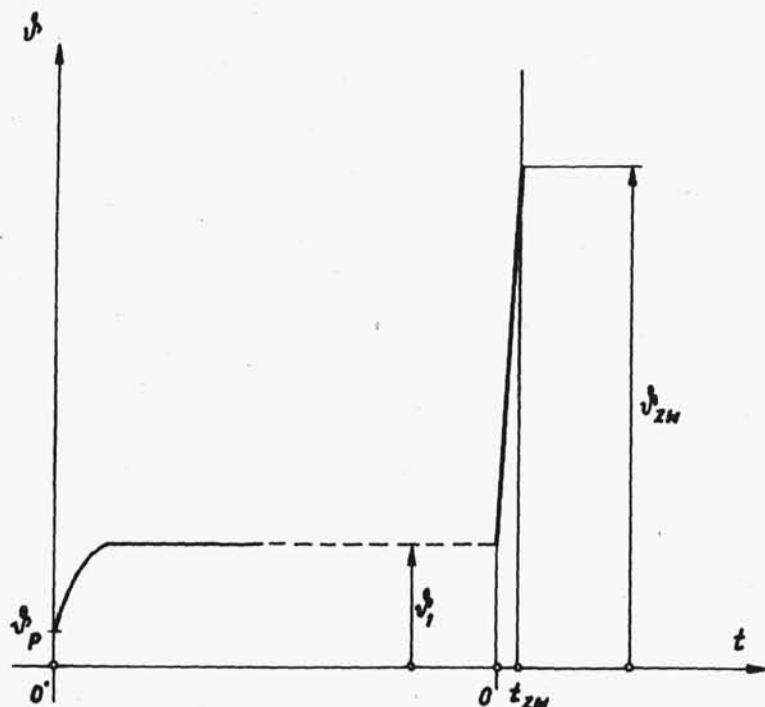


1.3.2. Wyznaczanie obciążalności zwarciowej cieplnej izotropowych torów prądowych

1.3.2.1. Wzory wyjściowe do obliczeń

Punktem wyjściowym do przeprowadzania obliczeń obciążalności zwarciowej cieplnej izotropowych torów prądowych są następujące założenia i spostrzeżenia:

- Zwarcie występuje w stanie uprzedniego obciążenia obwodu, a więc w stanie poprzedniego przepływu prądu roboczego, który nagrzewa tory prądowe aparatów i urządzeń do temperatury ϑ_1 (rys.1.11), której wartość przyjmuje się umownie jako $\vartheta_1 = 50^\circ\text{C}$.



Rys. 1.11. Przebieg nagrzewania przewodu przy zwarcu

- Czas trwania zwarcia nigdy nie przekracza 10s, co wobec wartości stałych czasowych interesujących nas torów prądowych^{x)}

^{x)} np. dla stosunkowo małego przekroju pręta o powierzchni utlenionej i o średnicy 8 mm stała czasowa wynosi ok. 530 s.

pozwała na pominięcie w bilansie cieplnym wg równania (1.7) wyrazu dq_1 określającego oddawanie ciepła do otoczenia.

- Z uwagi na znaczne temperatury występujące przy zwarciaach koniecznym jest uwzględnienie w obliczeniach zmiany oporności właściwej ρ_{ϑ} i ciepła właściwego c_{ϑ} w procesie nagrzewania, czyli

$$\left. \begin{aligned} \rho_{\vartheta} &= \rho_0 (1 + \alpha_0 \vartheta), \\ c_{\vartheta} &= c_0 (1 + \beta_0 \vartheta). \end{aligned} \right\} \quad (1.23)$$

Równanie bilansu cieplnego zapiszemy zatem w postaci

$$dq = dq_2, \quad (1.24)$$

gdzie dq tj. ciepło wytworzone na długości przewodu

Δx w czasie dt wynosi

$$dq = i^2 \frac{\rho_{\vartheta}^k}{S} \Delta x dt$$

- ciepło nagrzewania odcinka Δx przy przyroście temperatury $d\vartheta$ w czasie dt

$$dq_2 = c_{\vartheta} (\vartheta S \Delta x) d\vartheta.$$

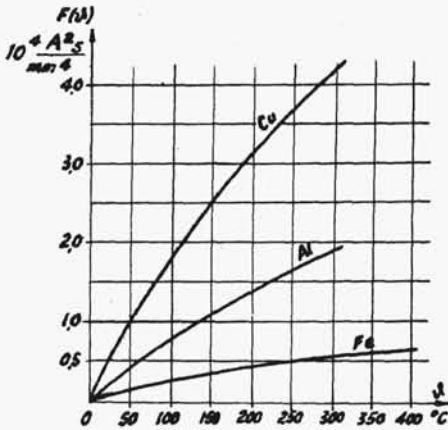
Po podstawieniu do (1.24) i uwzględniając (1.23) mamy

$$\left(\frac{i}{S}\right)^2 dt = \frac{\gamma c_0}{k_w \rho_0} \frac{1 + \beta_0 \vartheta}{1 + \alpha_0 \vartheta} d\vartheta.$$

Całkując w granicach czasu trwania zwarcia i w granicach temperatury przed zwarcie ϑ_1 i po nagrzaniu prądem zwarcio-
wym ϑ_2 (rys.1.11) otrzymujemy

$$\begin{aligned} \frac{1}{S^2} \int_{t=0}^{t=t_{ZW}} i^2 dt &= \frac{\gamma c_0}{k_w \rho_0} \int_{\vartheta=\vartheta_1}^{\vartheta=\vartheta_{ZW}} \frac{1 + \beta_0 \vartheta}{1 + \alpha_0 \vartheta} d\vartheta = \\ &= F(\vartheta_{ZW}) - F(\vartheta_1), \end{aligned} \quad (1.25)$$

gdzie
$$F(\vartheta) = \frac{\gamma c_0}{k_w \vartheta_0} \frac{\alpha_0 - \beta_0}{\alpha_0^2} \left[\ln(1 + \alpha_0 \vartheta) + \frac{\beta_0}{\alpha_0} \right].$$



Rys.1.12. Przebieg funkcji $F(\vartheta)$ dla różnych materiałów toru prądowego

Dla znanych stałych materiałowych γ , ϑ_0 , c_0 , α_0 i β_0 oraz przy założeniu $k_w = 1$ można wyznaczyć przebieg $F(\vartheta)$ dla różnych materiałów przewodu, jak tego wynik podaje rys.1.12.

W przypadku poszukiwania dopuszczalnej obciążalności prądowej zwarciowej zakładamy zwykle $\vartheta_1 = 50^\circ\text{C}$ i $\vartheta_{zw} = \vartheta_{\max}$. Wartości ϑ_{\max} dla łączników wysokiego napięcia podane są w tabelicy 6.

Wówczas

$$\frac{1}{S^2} \int_{t=0}^{t=t_{zw}} i^2 dt = F(\vartheta_{\max}) - F(\vartheta_1). \quad (1.26)$$

Wartość całki po lewej stronie równania (1.26) określamy jako

$$\frac{1}{S^2} \int_{t=0}^{t=t_{zw}} i^2 dt = I_c^2 t_{zw}, \quad (1.27)$$

gdzie I_c jest prądem zastępczym o przebiegu ustalonym, który przepływając przez przewód w ciągu czasu trwania zwarcia, spowodowałby nagrzewanie równoważne wywołanemu w tym czasie nieustalonym przebiegiem prądu zwarciowego.

Prąd cieplny I_c dla określonego czasu trwania zwarcia t_z może być wyznaczony jako

$$I_c = k_c I_p,$$

gdzie k_c - współczynnik zależny od reaktancji procentowej obwodu zwartego i czasu trwania zwarcia podany jest na rys.3.2.

Znając zatem wartości I_p , t_{zw} oraz k_c możemy dla określonego materiału przewodowego znaleźć najmniejszy dopuszczalny przekrój toru prądowego z zależności (1.27) przekształconej do postaci

$$S_{min} = I_p k_c \sqrt{\frac{t_{zw}}{F(\vartheta_{max}) - F(\vartheta_1)}}, \quad (1.27a)$$

lub też znając przekrój S dla czasu ($t_{zw} = n$) wyznaczyć dopuszczalną wartość prądu zwarcia obciążalności cieplnej n -sekundowej

$$I_{cn} \leq S \sqrt{\frac{F(\vartheta_{max}) - F(\vartheta_1)}{n}}. \quad (1.27b)$$

Znamionowy prąd krótkotrwały tj. obciążalność zwarcia cieplna n -sekundowa aparatu jest to wartość skuteczna największego prądu zastępczego o ustalonym przebiegu, który może wytrzymać aparat bez uszkodzenia w czasie n -sekund.

Rozróżniamy $n = 1s$, $n = 3s$, $n = 4s$, $n = 5s$ i $n = 10s$.

Przy tym należy pamiętać, że wzór (1.27b) jest odpowiedni do wyznaczania obciążalności cieplnej 1-sekundowej, ponieważ przy dłuższych czasach trwania zwarcia nie należy już pomijać pewnego odpływu ciepła do otoczenia, czyli wpływu dq_1 . Wzór (1.24) jest bowiem, jak pamiętamy, wzorem przybliżonym.

Zatem

$$I_{c10}^2 \cdot 10s > I_{c5}^2 \cdot 5s > I_{c1}^2 \cdot 1s.$$

1.3.2.2. Przykłady liczbowe

A. Obliczyć obciążalność cieplną 1 i 5 sekundową gołej szyny miedzianej o przekroju 200 mm^2 :

- a) ułożonej na izolatorach wsporczych porcelanowych,
- b) zaizolowanej w izolacji klasy A.

Z tablicy 6 znajdujemy

- dla przypadku a) : $\vartheta_{max} = 300^\circ\text{C}$,
- dla przypadku b) : $\vartheta_{max} = 250^\circ\text{C}$.

Z wykresu rys.1.12 odpowiednio wartości $F(\vartheta)$ wynoszą:

$$F(300^{\circ}\text{C}) = 4,2 \cdot 10^4 \frac{\text{A}^2\text{s}}{\text{mm}^4},$$

$$F(250^{\circ}\text{C}) = 3,7 \cdot 10^4 \frac{\text{A}^2\text{s}}{\text{mm}^4},$$

$$F(50^{\circ}\text{C}) = 1,0 \cdot 10^4 \frac{\text{A}^2\text{s}}{\text{mm}^4}.$$

Ze wzoru (1.27b) znajdujemy kolejno

- dla przypadku a

$$\begin{aligned} I_{c1} &= S \sqrt{\frac{F(\vartheta_{\max}) - F(\vartheta_1)}{n}} = 200 \text{ mm}^2 \sqrt{\frac{(4,2 - 1,0) 10^4 \text{ A}^2\text{s}}{\text{mm}^4 \cdot 1\text{s}}} = \\ &= 35,6 \text{ kA}, \end{aligned}$$

$$I_{c5} \cong I_{c1} \sqrt{\frac{1}{5}} = 35,6 \text{ kA} \sqrt{\frac{1}{5}} = 16 \text{ kA},$$

- dla przypadku b

$$I_{c1} = 200 \text{ mm}^2 \sqrt{\frac{(3,7 - 1,0) 10^4 \text{ A}^2\text{s}}{\text{mm}^4 \cdot 1\text{s}}} = 32,8 \text{ kA},$$

$$I_{c5} = 32,8 \text{ kA} \sqrt{\frac{1}{5}} = 15,4 \text{ kA}.$$

Izolacja klasy A ogranicza zatem zwarciovą obciążalność cieplną rozpatrywanego przewodu.

B. Obliczyć obciążalność cieplną 1-sekundową przewodu u-zwojenia pierwotnego przekładnika prądowego w przypadku stosowania izolacji klasy A i przy przyjęciu znamionowej gęstości prądu $j_n = 2 \text{ A/mm}^2$.

Skorzystamy ze wzoru (1.27b)

$$I_{c1} = S \sqrt{\frac{F(\psi_{\max}) - F(\psi_1)}{n}},$$

gdzie $S = \frac{I_n}{j_n} = \frac{I_n}{2A/\text{mm}^2},$

$$F(\psi_{\max}) = F(250^\circ\text{C}) = 3,7 \cdot 10^4 \frac{\text{A}^2\text{s}}{\text{mm}^4},$$

(z rys.1.12 dla izolacji kl.A)

$$F(\psi_1) = F(50^\circ\text{C}) = 1,0 \cdot 10^4 \frac{\text{A}^2\text{s}}{\text{mm}^4},$$

$$n = 1 \text{ s},$$

zatem

$$I_{c1} = \frac{I_n \text{ mm}^2}{2A} \sqrt{\frac{(3,7 - 1,0) 10^4 \text{ A}^2\text{s}}{1\text{s mm}^4}} \approx 80 I_n.$$

1.3.3. Wyznaczanie obciążalności zwarciowej elektrodynamicznej torów prądowych

1.3.3.1. Metody obliczania sił elektrodynamicznych

Przepływ prądu elektrycznego (ładunku) w torach prądowych aparatów, łuku elektrycznym, przewodach znajdujących się w obcym polu magnetycznym powoduje powstawanie sił działających na przepływające ładunki a więc na tory prądowe, łuk elektryczny czy przewody, tzw. sił elektrodynamicznych. Różniamy trzy rodzaje sił elektrodynamicznych, a mianowicie:

- siły elektrodynamiczne pomiędzy przewodami prądowymi lub torami prądowymi,
- siły występujące na powierzchniach granicznych materiałów o różnej przenikalności magnetycznej,