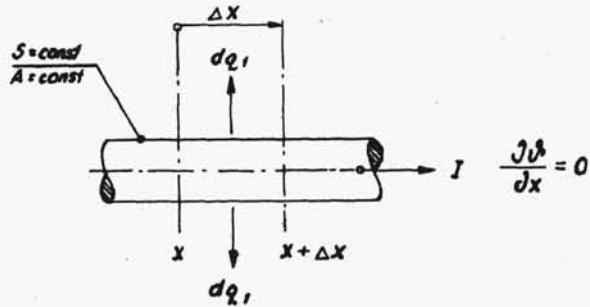


## 1.2. Wyznaczanie obciążalności prądowej ciągłej przewodów i aparatów

### 1.2.1. Wzory wyjściowe i tablice do obliczeń długich izotropowych torów prądowych

W obliczeniach praktycznych obciążalności prądowej ciągłej przewodów wychodzimy ze wzorów wyprowadzonych z rozwiązania równania nagrzewania prądem ciągłym o niezmienniej wartości długości przewodu izotropowego<sup>x)</sup> w stanie nieustalonym.

Dany jest zatem przewód o stałym obwodzie zewnętrznym  $A$  i stałym przekroju  $S$  o długości dostatecznej, aby można było pominąć przepływ ciepła wzdłuż jego osi (rys.1.3).



Rys.1.3. Nagrzewanie długiego przewodu izotropowego o stałym przekroju prądem  $I = \text{const}$ .

Zapisać możemy równanie bilansu cieplnego dla elementu przewodu o długości  $\Delta x$  i przekroju  $S$ , przez który przepływa prąd o wartości skutecznej  $I$

$$dq = dq_1 + dq_2, \quad (1.7)$$

gdzie  $dq$  - ilość ciepła wytworzona w rozpatrywanym elemencie przewodu w czasie  $dt$ ,

$dq_1$  - ilość ciepła oddawana do otoczenia przez powierzchnię zewnętrzną elementu  $\Delta x$  w czasie  $dt$ ,

$dq_2$  - ilość ciepła zużytego na nagrzanie elementu  $\Delta x$  w czasie  $dt$ .

x)

tj. o własnościach  $d\rho = 0$  i  $d\lambda = 0$ , gdzie  $\rho$  - elektryczna oporność właściwa materiału przewodowego,  $\lambda$  - przewodność cieplna materiału przewodowego.

Powyższe składniki bilansu cieplnego ująć można następującymi zależnościami

$$dq = I^2 \Delta R dt = I^2 \frac{\varrho_0 k_w (1 + \alpha_0 \vartheta) \Delta x}{S} dt, \quad (1.8)$$

gdzie  $k_w = k_0 k_z$  współczynnik wypierania będący iloczynem współczynnika naskorkowości  $k_0$  i współczynnika zbliżenia  $k_z$ ,

$$\alpha_0 = \frac{1}{\varrho_0} \frac{d\varrho}{d\vartheta} \bigg|_{\vartheta=0^\circ\text{C}} \quad \begin{array}{l} \vartheta = \vartheta_{\text{max}} - \text{współczynnik temperaturowy} \\ \vartheta = 0^\circ\text{C} \quad \text{oporności elektrycznej w zakresie } (0^\circ - \vartheta_{\text{max}})^\circ\text{C}, \end{array}$$

$\varrho_0$  - oporność elektryczna właściwa w temperaturze  $0^\circ\text{C}$ .

$$dq_1 = k(A \Delta x)(\vartheta - \vartheta_0) dt = kA(\vartheta - \vartheta_0) \Delta x dt, \quad (1.9)$$

gdzie  $k$  - współczynnik powierzchniowy odpływu ciepła (wartości liczbowe w tabelicy 2),

$A$  - obwód przekroju poprzecznego przewodu prętowego.

$$dq_2 = (S \Delta x) \gamma c d\vartheta \approx S \gamma c_N \Delta x d\vartheta, \quad (1.10)$$

Tabela 2

Wartości powierzchniowego współczynnika odpływu ciepła  $k$   
(do wzoru 1.9)

Rodzaj powierzchni	$k \frac{W}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$	
	w powietrzu	w oleju izolacyjnym
Pręty miedziane o średnicy 1 - 6 cm, powierzchnia utleniona, ułożone poziomo	$(1,3-0,85)10^{-3}$	-
Płaskowniki miedziane, powierzchnia utleniona, ułożone poziomo:		
a) wymiary przekroju 100x6 mm <sup>2</sup>	$0,6 \cdot 10^{-3}$	-
b) wymiary przekroju 76x3 mm <sup>2</sup>	$0,9 \cdot 10^{-3}$	-
Ściana pionowa o powierzchni lakierowanej	$(1,2-1,6)10^{-3}$	-
Powierzchnia cewek z izolacją papierową	$(1,0-1,25)10^{-3}$	$(2,5-3,6)10^{-3}$
Pakiety blachy stalowej	$(1,0-1,25)10^{-3}$	$(8,0-9,0)10^{-3}$
Taśma oporowa z drutu o średnicy 1 mm	-	$100 \cdot 10^{-3}$

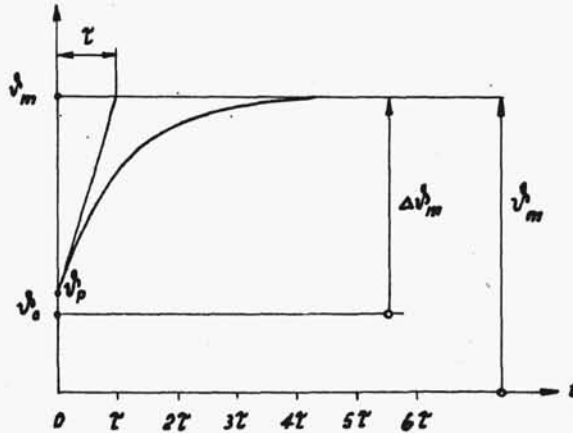
gdzie  $c$  - ciepło właściwe, tj. ilość ciepła potrzebna do ogrzania masy 1g ciała o  $1^{\circ}\text{C}$ ,

$c_N$  - ciepło właściwe w temperaturze normalnej,

$\gamma$  - ciężar właściwy materiału przewodowego,

$S$  - powierzchnia przekroju przewodu prętowego.

Rozwiązanie równania (1.7) ma postać (rys.1.4)



Rys.1.4. Nagrzewanie prądem o wartości niezmiennej

$$\vartheta = \vartheta_m - (\vartheta_m - \vartheta_p)e^{-t/\tau} \quad (1.11)$$

gdzie  $\tau = \frac{S \gamma c_N}{kA - j^2 S \rho_0 k_w \alpha_0}$  - jest stałą czasową nagrzewania,

$\vartheta_m = \frac{j^2 S \rho_0 k_w + kA \vartheta_0}{kA - j^2 S \rho_0 k_w \alpha_0}$  - jest składową ustaloną temperatury części aparatu lub przewodu,

$\vartheta_p$  - temperatura początkowa części aparatu lub przewodu.

W powyższych wzorach  $j$  oznacza gęstość prądu tj.  $j = I/S$ .

Przyrost temperatury względem temperatury otoczenia wg

(1.11)

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0 = (\vartheta_m - \vartheta_0) - (\vartheta_m - \vartheta_p)e^{-t/\tau},$$

w przypadku gdy  $\vartheta_p \cong \vartheta_0$

$$\Delta\vartheta = (\vartheta_m - \vartheta_0)(1 - e^{-t/\tau}) = \Delta\vartheta_m(1 - e^{-t/\tau}).$$

Skoro dla wartości stosunku  $t/\tau = 4$  z ostatniego wzoru mamy  $\Delta v = 0,98 \Delta v_m$  możemy zapamiętać, że po czasie  $t \geq 4\tau$  temperatura ustalona  $v_m$  została już praktycznie osiągnięta.

Podany wyżej wzór (1.11) można uprościć w przypadku małych gęstości prądu, gdy można założyć, że

$$j^2 \varrho_0 k_w \alpha_0 S \ll kA,$$

wtedy

$$\left. \begin{aligned} \tau &\cong \tau_N \cong \frac{c_N \gamma S}{kA}, \\ i \quad v_m &\cong v_0 + \frac{j^2 \varrho_0 k_w S}{kA} = v_0 + \Delta v_m. \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Powyższe uproszczenie nie jest jednak użyteczne w obliczeniach, ponieważ uzyskane tą drogą wartości temperatury ustalonej są znacznie niższe od rzeczywistych wobec pomijania istotnego przy praktycznie występujących gęstościach prądu<sup>x)</sup> wpływu współczynnika temperaturowego oporności.

Żeby wpływ zmiany tego współczynnika uwzględnić, należy wyznaczyć oporność właściwą przy przewidywanej temperaturze ustalonej  $v_m$ , tj.

$$\varrho_v \cong \varrho_0 (1 + \alpha_0 v_m).$$

Przy tym przeliczeniu przewodu mamy zwykle zadaną pewną wartość dopuszczalną jego temperatury ustalonej, tj.  $v_m = v_{\text{dop}}$ .

Wtedy wzory (1.12) możemy przepisać do postaci

$$\left. \begin{aligned} v_m &\cong v_0 + \frac{j^2 \varrho_v k_w S}{kA} = v_0 + \Delta v_m, \\ \tau &\cong \tau_N \cong \frac{c_N \gamma S}{kA}. \end{aligned} \right\} \quad (1.12a)$$

Przyjęcie we wzorze NEWTONA (1.9) wspólnego współczynnika oddawania ciepła  $k$  o wartościach niezależnych od temperatury

<sup>x)</sup> np dla miedzi  $j = 2 - 3 \text{ A/mm}^2$

powierzchni przewodu i temperatury otoczenia jest oczywiście pewnym przybliżeniem upraszczającym.

W szeregu zagadnień obliczeniowych należy uwzględnić rozdzielnie udział w oddawaniu ciepła przez

- promieniowanie (w próżni, a w przybliżeniu i w gazach),
- przejmowanie ciepła - konwekcję (w gazach i cieczach),
- przewodnictwo (w ciałach stałych).

A. Strumień ciepła wypromieniowanego w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni ciała o temperaturze bezwzględnej  $\Theta$  do nieograniczonego otoczenia o temperaturze  $\Theta_0 < \Theta$  określa prawo STEFANA - BOLTZMANNNA

$$q_{pr} = \varepsilon c_0 (\Theta^4 - \Theta_0^4), \quad (1.13)$$

$$\begin{aligned} \text{gdzie } c_0 &= 4,96 \cdot 10^{-8} \frac{\text{k cal}}{\text{m}^2 \text{h } ^\circ\text{K}^4} = \frac{4,96 \cdot 10^{-8} \text{ kcal kWh m}^2}{860 \text{ k cal m}^2 \text{h } ^\circ\text{K}^4 \cdot 10^4 \text{ cm}^2} = \\ &= 5,76 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4}. \end{aligned}$$

Wartości liczbowe  $\varepsilon$  podane są w tablicy 3.

B. Strumień ciepła  $q_k$  w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni ciała nagrzanego o temperaturze  $\vartheta$  do gazu lub cieczy o temperaturze  $\vartheta_0$  drogą konwekcji

$$q_k = \alpha_k (\vartheta - \vartheta_0), \quad (1.14)$$

gdzie  $\alpha_k$  - powierzchniowy współczynnik oddawania ciepła (zestawienie wzorów do obliczeń w tablicy 4).

Jeśli w dalszym ciągu naszych rozważań i dla torów prądowych w powietrzu pominiemy oddawanie ciepła przez przewodnictwo (które w tym przypadku nie odgrywa praktycznie żadnej roli), możemy zapisać wyrażenie na sumaryczny strumień ciepła oddawany w jednostce czasu przez jednostkę długości przewodu do otoczenia jako

$$q_1 = A(q_{pr} + q_k) = A[\varepsilon c_0 (\Theta^4 - \Theta_0^4) + \alpha_k (\vartheta - \vartheta_0)] \quad (1.15)$$

Tablica 3

Wartości  $\varepsilon$  dla różnych materiałów

Materiał	Stan powierzchni	$\nu$	$\varepsilon$
		$^{\circ}\text{C}$	-
Aluminium	polerowana	23	0,052
Aluminium	walcowana	26	0,07-0,08
Miedź	polerowana	20	0,04
Miedź	walcowana	-	0,63
Mosiądz	walcowana	22	0,068
Stal konstrukcyjna	-	21	0,68
Żeliwo obtoczone	-	22	0,44
Żeliwo	utleniona	-	0,88-0,985
Porcelana	glazurowana	22	0,924
Farba szara i zielona	matowa	100	0,92-0,96
Lakier biały	matowa	23	0,906
Lakier czarny	błyszcząca	25	0,875-0,90
Lakier czarny	matowa	40-95	0,96-0,98
Azbest	-	20	0,95
Sadza zwykła	-	100	0,945-0,97

Równanie to możemy sprowadzić do postaci (1.9) wzoru NEWTONa, jeśli na współczynnik  $k$  w tym wzorze podstawimy wyrażenie, zależne już od temperatury przewodu i temperatury otoczenia

$$k = \varepsilon c_0 \frac{\theta^4 - \theta_0^4}{\nu - \nu_0} + \alpha_k. \quad (1.16)$$

Tablica 4

Zestawienie wzorów do wyznaczania współczynnika  $\alpha_k$

Rodzaj powierzchni	$\alpha_k = f(\vartheta)$
<p>a. <u>Konwekcja swobodna</u></p> <p>a.1. Walec o średnicy <math>d=1\div 8</math> cm ułożony w powietrzu, jeśli</p> $(\vartheta_m - \vartheta_o) =$ $= (20\div 100)^{\circ}\text{C}$ <p>a.2. Walec ułożony pionowo w powietrzu</p> <p>a.3. Płaskownik ułożony poziomo "na sztorc" w powietrzu, jeśli</p> $(\vartheta_m - \vartheta_o) =$ $= (25\div 80)^{\circ}\text{C}$ <p>a.4. Płaszczyzna pionowa o wys. do 10 cm w oleju transformatorowym</p>	$\alpha_k = 3,5 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{W_{cm}^{0,25}}{cm^2 \cdot o_C^{1,25}} \right] \left( \frac{1}{d} \right)^{0,25} (\vartheta - \vartheta_o)^{0,25}$ $\alpha_k = 1,8 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{W}{cm^2 \cdot o_C^{1,33}} \right] (\vartheta - \vartheta_o)^{0,33}$ $\alpha_k = 1,5 \cdot 10^{-4} \left[ \frac{W}{cm^2 \cdot o_C^{1,35}} \right] (\vartheta - \vartheta_o)^{0,35}$ $\alpha_k = (38\div 48) 10^{-4} \left[ \frac{W}{cm^2 \cdot o_C^{1,25}} \right] (\vartheta - \vartheta_o)^{0,25}$
<p>b. <u>Konwekcja wymuszona</u></p> <p>b.1. Walec o średnicy <math>d</math> w przepływie powietrza o prędkości <math>w</math> i ciśnieniu <math>p_N</math></p>	$\alpha_k = 2,85 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{W_{cm}^{0,5}}{cm^2 \cdot o_C} \left( \frac{s}{m} \right)^{0,5} \right] \sqrt{\frac{W}{d}}$

- U w a g a: 1. Wzór b1 można stosować również przy konwekcji swobodnej dla walców ułożonych poziomo w powietrzu przyjmując dla:
- pomieszczeń zamkniętych  $w = (0,1 \div 0,15) \text{ m/s}$ ,
  - na otwartym powietrzu  $w = 0,6 \text{ m/s}$ .
2. Dla ciśnień różnych od  $p_N$  należy wyniki wzorów a1 i b1 pomnożyć przez  $\sqrt{\frac{p}{p_N}}$

Ze wzoru (1.16) widać, że współczynnik  $k$  we wzorze NEWTONa zależy od przedziału temperatur, a więc zależy zarówno od temperatury nagrzewanego ciała jak i od temperatury otoczenia ( $\alpha_k$  jest również funkcją temperatury - tablica 4).

### 1.2.2. Przykłady liczbowe obliczania torów prądowych

A. Obliczyć dopuszczalną obciążalność prądową ciągłą prądem zmiennym 50 Hz przy  $k_w = k_o \cdot k_z > 1$ , odosobnionego przewodu szynowego ( $k_z = 1$ ) miedzianego o przekroju  $S = 100 \times 10 \text{ mm}^2$  ułożonego poziomo w powietrzu "na sztorc", jeśli powierzchnia przewodu jest

- a) utleniona,
- b) malowana.

Zadana jest temperatura dopuszczalna  $\vartheta_{\text{dop}} = 75^\circ\text{C}$  przy obliczeniowej temperaturze otoczenia  $\vartheta_o = 25^\circ\text{C}$ .

Wychodzimy ze wzoru (1.12a), skoro temperatura  $\vartheta_m$  została z góry określona przez podanie założenia  $\vartheta_m = \vartheta_{\text{dop}}$ . Otrzymujemy

$$I_{\text{dop}} = j S = \sqrt{\frac{kAS \Delta\vartheta_{\text{dop}}}{\rho_{\vartheta} k_w}},$$

gdzie dopuszczalny przyrost temperatury

$$\Delta\vartheta_{\text{dop}} = \vartheta_m - \vartheta_o = \vartheta_{\text{dop}} - \vartheta_o = (75 - 25)^\circ\text{C} = 50^\circ\text{C}$$

oraz

$$\rho_{\vartheta} = \rho_{70^\circ\text{C}} = \rho_o (1 + \alpha_o \vartheta_{\text{dop}}) =$$

$$= 0,0161 \cdot 10^{-4} \Omega\text{cm} (1 + 4,28 \cdot 10^{-3} \cdot 75) = 0,0222 \cdot 10^{-4} \Omega\text{cm}$$

$$\text{wobec wartości } \alpha_o = 4,28 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}.$$

Dla wyznaczenia współczynnika  $k_w = k_o k_z$  przy założeniu  $k_z = 1$  musimy wyznaczyć wartość  $k_o$  z tablicy 5 dla wartości współczynnika pomocniczego



Wartości współczynnika naskórkowości  $k_o$  dla przewodów szynowych o przekroju prostokątnym

Stosunek długości boków przekroju poprzecznego	$\sqrt{\frac{8\pi f s}{10^9 \rho_0}}$											
	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8
1:1	1,18	1,36	1,55	1,74	1,93	2,1	2,28	2,46	2,68	2,84	3,02	3,22
2:1	1,13	1,30	1,49	1,67	1,84	2,03	2,21	2,40	2,40	2,77	2,96	3,16
4:1	1,12	1,28	1,38	1,49	1,68	1,78	1,94	2,10	2,24	2,39	2,56	2,70
6:1	1,10	1,26	1,36	1,46	1,57	1,68	1,79	1,90	2,09	2,20	2,36	2,54
8:1	1,08	1,23	1,34	1,43	1,51	1,60	1,70	1,79	1,90	2,04	2,20	2,37
12:1	1,07	1,21	1,30	1,40	1,48	1,56	1,63	1,71	1,79	1,87	1,97	2,06

$$\sqrt{\frac{8 \pi f S}{10^9 \cdot \rho_0}} = \sqrt{\frac{8 \pi \cdot 50 \cdot 10 \text{ cm}^2}{10^9 \cdot 1,61 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ cm}}} = 2,8.$$

Z danych tablicy interpolować możemy wartość  $k_0 = 1,15$ ,  
wobec czego  $k_w = k_0 k_z = 1,15$ .

Pozostaje nam obecnie wyznaczenie wartości współczynnika oddawania ciepła  $k$  ze wzoru Newtona.

Z tablicy 2 przyjąć możemy orientacyjne wartości współczynników  $k$

- dla szyny utlenionej  $k = 0,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ ,

- dla szyny malowanej  $k = (1,2 - 1,3) \cdot 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$ .

W dalszym ciągu wyznaczmy dokładniejsze wartości tego współczynnika określając rozdzielnie udziały od konwekcji i promieniowania.

Współczynnik przejmowania ciepła przy konwekcji swobodnej (niezależny od stanu powierzchni przewodu) wg danych z tablicy 4 wynosi

$$\begin{aligned} \alpha_k &= 1,5 \cdot 10^{-4} (\vartheta - \vartheta_0)^{0,35} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}^{1,35}} = \\ &= 1,5 \cdot 10^{-4} (75-25)^{0,35} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} = 5,35 \cdot 10^{-4} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}. \end{aligned}$$

Współczynnik przejmowania ciepła przy promieniowaniu dla danych wartości  $\varepsilon$  z tablicy 3 i  $c_0 = 5,76 \cdot 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4}$

(patrz wzór 1.13) wyniesie

- dla powierzchni utlenionej ( $\varepsilon = 0,5$ )

$$\begin{aligned} \varepsilon c_0 \frac{\vartheta^4 - \vartheta_0^4}{\vartheta - \vartheta_0} &= 0,5 \cdot 5,76 \cdot 10^{-12} \frac{348^4 - 298^4}{50^{\circ\text{C}}} \text{ } ^\circ\text{K}^4 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{K}^4} = \\ &= 3,95 \cdot 10^{-4} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}, \end{aligned}$$

- dla powierzchni malowanej ( $\xi = 0,95$ )

$$\xi c_o \frac{\theta_o^4 - \theta_o^4}{\nu - \nu_o} = \frac{0,95}{0,5} 3,95 \cdot 10^{-4} \frac{W}{cm^2 \text{ } ^\circ C} = 7,5 \cdot 10^{-4} \frac{W}{cm^2 \text{ } ^\circ C} .$$

Wartości wypadkowego współczynnika  $k$  wg (1.16) wyniosą zatem

- dla powierzchni utleniowej

$$k = (3,95 + 5,35) 10^{-4} \frac{W}{cm^2 \text{ } ^\circ C} = 9,30 \cdot 10^{-4} \frac{W}{cm^2 \text{ } ^\circ C} ,$$

- dla powierzchni malowanej

$$k = (7,50 + 5,35) 10^{-4} \frac{W}{cm^2 \text{ } ^\circ C} = 12,85 \cdot 10^{-4} \frac{W}{cm^2 \text{ } ^\circ C} .$$

Wobec zebrania potrzebnych danych wyznaczyć możemy obciążalności prądowe ciągłe zadanego przewodu szynowego

- dla powierzchni utlenionej

$$I_{dop} = \sqrt{\frac{9,3 \cdot 10^{-4} W \cdot 22 \text{ cm} \cdot 10 \text{ cm}^2 \cdot 50^\circ C}{cm^2 \text{ } ^\circ C \cdot 0,0222 \cdot 10^{-4} \Omega \text{ cm} \cdot 1,15}} = 2000 \text{ A} ,$$

- dla powierzchni malowanej

$$I_{dop} = \sqrt{\frac{12,85}{9,30}} 2000 \text{ A} = 1,18 \cdot 2000 \text{ A} = 2360 \text{ A} .$$

B. Obliczyć obciążalność prądową ciągłą prądem zmiennym 50 Hz (przy  $k_o = 1$ ) odosobnionego ( $k_z = 1$ ) przewodu szynowego z miedzi o powierzchni przekroju  $480 \text{ mm}^2$  ułożonego poziomo w powietrzu na "sztorc", jeśli powierzchnia przewodu jest malowana, dla trzech różnych kształtów przekroju

- prostokątnego o wymiarach  $80 \times 6 \text{ mm}^2$ ,
- prostokątnego o wymiarach  $60 \times 8 \text{ mm}^2$ ,
- kołowego.

$$\text{Zadane są } \Delta \vartheta_{\text{dop}} = \vartheta_{\text{dop}} - \vartheta_0 = (75 - 25)^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C},$$

$$\alpha_0 = 4,28 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}\text{C}},$$

$$\rho_0 = 4,28 \cdot 10^{-3} \Omega \text{ cm},$$

$$k = 12,85 \cdot 10^{-4} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}}.$$

C. Wyznaczyć obciążalność prądową ciągłą (prądem zmiennym 50 Hz przy  $k_w = k_0 = 1,05$ ) przewodu szynowego z miedzi o przekroju  $60 \times 5 \text{ mm}^2$  ułożonego poziomo w powietrzu na "sztorc", jeśli powierzchnia przewodu jest malowana.

$$\text{Zadane są } \Delta \vartheta_{\text{dop}} = \vartheta_{\text{dop}} - \vartheta_0 = (75-25)^{\circ}\text{C} = 50^{\circ}\text{C},$$

$$\alpha_0 = 4,28 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}\text{C}},$$

$$\rho_0 = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ cm}$$

oraz współczynnik oddawania ciepła przez konwekcję

$$\alpha_k = 5,35 \cdot 10^{-4} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C}} \quad \text{i ilość ciepła oddawaną przez}$$

$$\text{promieniowanie } q_{\text{pr}} = 3,75 \cdot 10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}.$$

D. Wyznaczyć wymiary przekroju prostokątnego przewodu szynowego z miedzi o stosunku długości boków 8:1 dla obciążalności prądowej ciągłej 600 A. Założenia pozostałe jak w przykładzie C.

1.2.3. Kształtowanie przewodów szynowych dla bardzo dużych wartości obciążalności prądowej ciągłej

Dla bardzo dużych wartości obciążalności prądowej ciągłej<sup>x)</sup> zwłaszcza przy prądzie zmiennym stosowanie pojedynczych przewodów szynowych okazuje się niecelowym z uwagi na naskórkowość.

<sup>x)</sup> tj. przekraczających 2000 - 3000 A

Stosuje się wtedy czasem przewody rurowe a najczęściej przewody wielopaskowe lub profilowe. Ilustruje to rys.1.5, pokazujący kolejno układ dwupaskowy, dwuceownikowy i z rozłożeniem pasków na bokach kwadratu. Można tu podać, że zakładając dla wszystkich tych układów jednakową wartość przekroju



Rys.1.5. Przykłady kształtowania przewodów szynowych dla bardzo dużych wartości obciążalności ciągłej prądem zmiennym: a - układ dwupaskowy, b - układ dwuceownikowy, c - układ czworobokowy

miedzi równą około  $2000 \text{ mm}^2$  uzyskuje się następujące wartości obciążalności prądowej ciągłej:

- dla układu dwupaskowego około 3000 A, tj. przy średniej gęstości prądu  $j_{\text{Cu}} = 1,5 \text{ A/mm}^2$ ,
- dla układu dwuceownikowego około 4000 A, tj. przy średniej gęstości prądu  $j_{\text{Cu}} = 2 \text{ A/mm}^2$ ,
- dla układu czworobokowego około 5000 A, tj. przy średniej gęstości prądu  $j_{\text{Cu}} = 2,5 \text{ A/mm}^2$ .

Bliższe informacje na ten temat znajdzie czytelnik m.in. w podręczniku i pracy [5].

#### 1.2.4. Obciążalność prądowa ciągła aparatów i prąd znamionowy ciągły

Prąd znamionowy ciągły aparatu (lub wyzwalacza) jest to obciążalność prądowa, na którą aparat został zbudowany i oznaczony. Prąd znamionowy ciągły oznaczany jest na takich np. aparatach wysokiego napięcia jak łączniki, dławiki przeciwzwarciowe, izolatory przepustowe, nadmiarowo prądowe wyzwalacze pierwotne. Jest to w tym przypadku taka wartość prądu, która przepływając dowolnie długo przez tor prądowy nie spo-

woduje przekroczenia dopuszczalnych przyrostów temperatury podanych w odpowiedniej normie<sup>x)</sup>.

Przykładowo dla łączników w.n. dopuszczalne miejscowe przyrosty temperatur oraz dopuszczalne temperatury długotrwałe i krótkotrwałe podane są w tablicy 6 wyjętej z cytowanej już normy PN-64/E-06100.

Dla wymienionych wyżej aparatów wartości prądów znamionowych są znormalizowane, tworząc szereg liczb normalnych i wynoszą odpowiednio

- dla łączników z wyjątkiem wkładek bezpiecznikowych  
200, 400, 630, 800, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000 A;

- dla nadmiarowo prądowych wyzwalaczy pierwotnych  
6, 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630 A,

- dla wkładek bezpiecznikowych 6, 10, 15, 20, 25, 30, (35), 40, (50), 60, (75), 80, 100, 125, (150), 160, 200, 225, 260, 300, 350, 430, 500, 600 A.

Podane w tablicy dopuszczalne przyrosty temperatur  $\Delta v_{\text{dop}}$  odnoszone są do szczytowej krótkotrwałej temperatury otoczenia  $v_{\text{o max}}^{\text{e}}$  równej  $+40^{\circ}\text{C}$ . Zatem w przypadku wszystkich temperatur otoczenia  $v_{\text{o max}}^{\text{e}} \leq 40^{\circ}\text{C}$  doboru prądu znamionowego aparatu dokonuje się tak, aby był on równy lub większy od prądu obciążeniowego  $I_n \geq I_r$ .

W przypadku natomiast temperatury otoczenia  $v_{\text{o max}}^{\text{e}}$  wyższej od  $40^{\circ}\text{C}$  dopuszczalna obciążalność prądowa ciągła aparatu  $I_n$  powinna być obniżona do wartości  $I'$  spełniającej dla każdego miejsca w aparacie równość

$$I' = I_n \sqrt{\frac{v_{\text{dop}}^{\text{e}} - v_{\text{o max}}^{\text{e}}}{\Delta v_{\text{dop}}^{\text{e}}}}, \quad (1.17)$$

gdzie  $v_{\text{dop}}^{\text{e}} = \Delta v_{\text{dop}}^{\text{e}} + v_{\text{o max}}^{\text{e}} = \Delta v_{\text{dop}}^{\text{e}} + 40^{\circ}\text{C}$ .

<sup>x)</sup> Jedynie w przypadku przekładników prądowych wymaga się, aby prąd ich dopuszczalnego obciążenia długotrwałego był większy o 20% od znamionowego prądu ciągłego.

Tablica 6

Dopuszczalne przyrosty temperatury i dopuszczalne temperatury  
długotrwałe i krótkotrwałe wg PN-64/E-06100

Część i materiał	Dopuszczalny przyrost temperatury $\Delta t_{dop}$	Dopuszczalna temperatura długotrwała $t_{dop}$	Dopuszczalna temperatura krótkotrwała $t_{dop \max}$		
			miedź mosiądz brąz	alu- minium	stal
	°C				
Części torów prądowych gołe, w powietrzu (z wyjątkiem styków)	65	105	300	200	400
Części torów prądowych gołe, w oleju (z wyjątkiem styków)	60	100	250	200	250
Styki srebrne lub pokryte srebrem w powietrzu	65	105	Przy zwarciu nie powinno występować szczytowanie styków		
Styki srebrne lub pokryte srebrem w oleju	50	90			
Styki miedziane w powietrzu lub w oleju	35	75			
Części sprężynujące miedziane fosforo brązowe stalowe	35	75	Przy zwarciu nie powinna występować utrata sprężystości		
	65	105			
	90	130			
Zaciski przyłączeniowe	45	85	300	200	400
Przewody i uzwojenia w powietrzu w izolacji klasy (wg PN/E-02050 - projekt)					
Y	45	85	200	200	200
A	60	100	250	200	250
E	75	115	-	-	-
B	80	120	300	200	400
F	100	140	-	-	-
H	125	165	-	-	-
C	-xx	165	300	200	400
Przewody uzwojenia w oleju w izolacji wszystkich klas	60	100	250	200	250
Inne części w oleju	60	100	250	200	250
Izolacja i gasiwo ciekłe w łączniku	olej	40	80	-	-
	inne	30	70	-	-
Olej w przekładnikach	50	90	-	-	-
Oslony bezpiecznikowe z materiału izolacyjnego klasy C	165	205	-	-	-
<p>x) W przypadku zestyków łączeniowych o stykach pokrytych srebrem podwyższony przyrost temperatury może być wykorzystany tylko wówczas, jeżeli po wykonaniu 100 cykli łączeniowych została stwierdzona ciągłość powłoki srebrnej na powierzchni styków.</p> <p>xx) W zasadzie ograniczony przez dopuszczalny przyrost temperatury części sąsiadujących z danym przewodem izolowanym lub uzwojeniem.</p>					

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 zwarciowa 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: