

Analiza wyznaczania obciążalności ciągłej torów prądowych z zestykami i rozpraszaczami ciepła

Wyznaczanie obciążalności prądowej ciągłej torów prądowych jednorodnych jest realizowane na ogół przy pomocy metody bilansowej. W praktyce w torach prądowych występują zmiany przekroju przewodnika, istnieją dodatkowe źródła lub rozpraszacze ciepła, a także występuje częściowa lub całkowita izolacja toru. W artykule przedstawiono sposób obliczania przyrostów temperatury wzdłuż toru prądowego z zestykami i rozpraszaczami ciepła, a także podano wyniki pomiarów przyrostów temperatury w badanych torach prądowych.

1. WPROWADZENIE

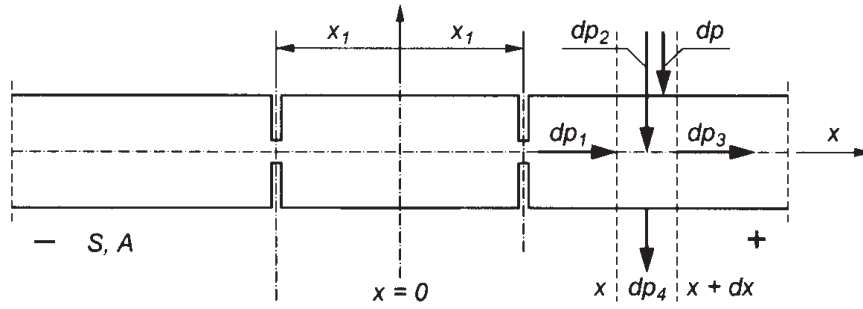
Nagrzewanie torów prądowych aparatów elektrycznych, a zwłaszcza zestyków i elementów z nimi sąsiadujących, od przepływającego przez nie prądu elektrycznego ma niekorzystny wpływ na niezawodność tych urządzeń. Wzrost temperatury jest ściśle związany z obciążeniem prądowym toru, gdyż wpływa na wzrost strat dielektrycznych w elementach izolacyjnych toru, zmniejsza jego wytrzymałość mechaniczną i jest przyczyną przyspieszenia procesów starzeniowych. Wiąże się to z zapewnieniem nieprzekraczania temperatur dopuszczalnych, najczęściej znormalizowanych podczas eksploatacji toru, oraz znormalizowanej wartości temperatury otoczenia (odniesienia), przyjmowanej zwykle jako 40°C [1, 7]. W literaturze spotyka się też wymagania sprawdzania obciążalności prądowej ciągłej torów prądowych, zestyków oraz sąsiadujących z nimi elementów izolacyjnych i konstrukcyjnych przy temperaturze otoczenia wynoszącej 35°C lub 45°C. Z uwagi na to, że dopuszczalna temperatura dla zestyków jest co najwyżej równa dopuszczalnej temperaturze toru prądowego (bez zestyków), o obciążalności długotrwałej całego toru decyduje układ zestykowy.

Wyznaczanie obciążalności prądowej torów prądowych może być realizowane m.in. takimi metodami, jak [2, 3, 6, 7]: bilansowa, sieci cieplnych, lokalnych źródeł ciepła. Charakteryzują się one różną

złożonością obliczeń i dokładnością uzyskiwanych wyników. Analityczne wyznaczenie obciążalności torów prądowych jest możliwe, z dostateczną dokładnością, metodą bilansową w przypadku torów jednorodnych o nieskomplikowanych kształtach. Metoda sieci cieplnych, wykorzystująca analogie między wielkościami cieplnymi i elektrycznymi, jest stosowana w analizie nagrzewania pól rozdzielnic, maszyn elektrycznych i przekształtników energoelektrycznych. W przypadku układów złożonych, zwłaszcza torów niejednorodnych tworzących ciągi szyn, zestyków i rozpraszaczy ciepła (radiatorów), metoda lokalnych źródeł ciepła wydaje się najbardziej użyteczna do wyznaczania ich obciążalności prądowej ciągłej. W artykule przedstawiono sposób obliczania przyrostów temperatury wzdłuż toru prądowego z zestykami i rozpraszaczami ciepła, a także podano wyniki obliczeń i pomiarów przyrostów temperatury w badanych torach prądowych.

2. METODA LOKALNYCH ŹRÓDEŁ CIEPŁA

Metoda lokalnych źródeł ciepła pozwala na wyznaczenie rozkładu temperatury wzdłuż toru prądowego wyposażonego w zestyki, a także ewentualnie w rozpraszacze ciepła, o różnych przekrojach poprzecznych i kształtach, obciążone prądem ciągłym. W stosowanych w praktyce rozwiązaniach torów prądowych



Rys. 1. Rysunek do wyznaczania bilansu mocy w elemencie toru prądowego

dowych niskiego i średniego napięcia odległości między zestykami (rozpraszaczami ciepła) są niewielkie i niejednakowe, a ponadto nieznaną jest z reguły funkcja wydzielania ciepła wzdłuż zestyków (rozpraszaczy), co znacznie utrudnia wyznaczanie rozkładu temperatury w takich torach.

W przedstawionej metodzie punktem wyjścia jest znane równanie bilansu przyrostu mocy w dowolnym elemencie toru prądowego o stałym przekroju S , rezystywności materiału toru w temperaturze \mathcal{G} oraz obwodzie A przekroju poprzecznego danego elementu i stałym współczynnikiem oddawania ciepła k , a także współczynnikiem wypierania prądu k_w , przez który przepływa prąd I o nieziennej wartości, rozszerzone o składnik mocy wydzielanej przez dodatkowe źródło ciepła lub rozpraszanej na odcinku dx w jednostce czasu (rys. 1) [3, 4].

Równanie bilansu cieplnego dla elementu toru o długości dx ma postać:

$$dp_1 + dp_2 + dp_3 + dp_4 + dP = 0$$

gdzie:

dp_1 – moc strumienia cieplnego dopływająca do rozpatrywanego elementu w jednostce czasu;

dp_2 – moc wydzielana w rozpatrywanym elemencie w jednostce czasu;

dp_3 – moc strumienia cieplnego odpływająca od rozpatrywanego elementu w jednostce czasu;

dp_4 – moc oddana do otoczenia z powierzchni bocznej rozpatrywanego elementu w jednostce czasu;

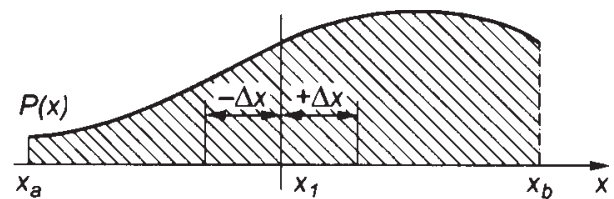
dP – moc wydzielana (rozpraszana przez dodatkowe źródło – rozpraszacz) na odcinku dx w jednostce czasu.

Podstawiając do równania poszczególne składniki bilansu [2, 3, 4], dla stanu ustalonego nagrzewania otrzymuje się zależność:

$$\frac{d^2 \mathcal{G}}{dx^2} - \frac{kA}{\lambda S} (\mathcal{G} - \mathcal{G}_0) + \frac{I^2 \rho_g k_w}{S^2 \lambda} + \frac{p(x)}{\lambda S} = 0$$

gdzie:

$p(x) = dP/dx$ – rozkład mocy dodatkowej wydzielanej (rozpraszanej) w torze prądowym (rys. 2).



Rys. 2. Przykładowy rozkład mocy dodatkowo wydzielanej (rozpraszanej) w torze prądowym

Oznaczając przyrost temperatury przez $\tau = \Delta \mathcal{G} = \mathcal{G} - \mathcal{G}_0$ oraz przechodząc z funkcji ciągłej do dyskretnego wydzielania mocy P_A w odległości x_1 od osi symetrii toru (rys. 2) i (lub) odbioru P_B mocy w odległości x_2 od osi symetrii $x = 0$, a także uwzględniając właściwość próbkową funkcji Diraca [5], otrzymano kolejno zależności:

$$p(x) = P \delta(x - x_1)$$

$$\frac{d^2 \tau}{dx^2} - \frac{kA}{\lambda S} (\mathcal{G} - \mathcal{G}_0) + \frac{I^2 \rho_g k_w}{S^2 \lambda} + \frac{P_A}{\lambda S} \delta(x - x_1) - \frac{P_B}{\lambda S} \delta(x - x_2) = 0$$

Rozwiązując z kolei to równanie, można na przykład wyznaczyć zależność na rozkład przyrostu temperatury $\tau(x)$ wzdłuż toru prądowego z zestykami i rozpraszaczami ciepła, a mianowicie:

$$\tau(x) = \frac{b_1}{a_1} + \frac{1}{2\sqrt{a_1} \lambda S} \left\{ \left[P_A e^{-\sqrt{a_1} x_1} - P_B e^{-\sqrt{a_1} x_2} \right] \left[e^{\sqrt{a_1} x} + e^{-\sqrt{a_1} x} \right]_{\varepsilon(x)} + \right. \\ \left. - P_A \left[e^{\sqrt{a_1} (x-x_1)} - e^{-\sqrt{a_1} (x-x_1)} \right]_{\varepsilon(x-x_1)} + P_B \left[e^{\sqrt{a_1} (x-x_2)} - e^{-\sqrt{a_1} (x-x_2)} \right]_{\varepsilon(x-x_2)} \right\}$$

gdzie:

$$a_1 = \frac{kA}{\lambda S}; \quad b_1 = \frac{I^2 \rho_g k_w}{\lambda S^2}$$

Przekształcając powyższy wzór na $\tau(x)$, można otrzymać analityczną zależność [3, 4] między mocą rozpraszaną $P_B\delta(x-x_2)$ przez rozpraszacz zamocowa-

ny w odległości x_2 a dopuszczalnym przyrostem temperatury w zestykach $\tau(x_1)$ i mocą w nich wydzielaną $P_A\delta(x-x_1)$:

$$P_B = \frac{P_A(1 + e^{-2\sqrt{a_1}x_1})_{\varepsilon(x)} - \left[\tau(x_1) - \frac{b_1}{a_1} \right] 2\sqrt{a_1}\lambda S}{\left[e^{\sqrt{a_1}(x_1-x_2)} + e^{-\sqrt{a_1}(x_1+x_2)} \right]_{\varepsilon(x)} - \left[e^{\sqrt{a_1}(x_1-x_2)} + e^{-\sqrt{a_1}(x_1-x_2)} \right]_{\varepsilon(x-x_2)}}$$

Znając wymaganą moc rozpraszaną P_B w danym miejscu toru prądowego, niezbędną do zachowania dopuszczalnego przyrostu temperatury w innym miejscu toru (na przykład w zestyku), można z katalogów rozpraszaczy określić zarówno typ, jak i jego wymiary.

3. ANALIZA I BADANIA ROZKŁADU TEMPERATURY W TORACH PRĄDOWYCH

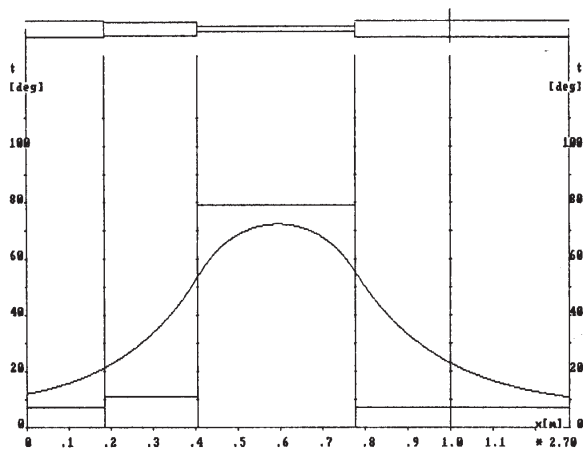
W celu wyznaczenia rozkładu temperatury w torach prądowych na podstawie przedstawionej metody opracowano program komputerowy. Składa się on z czterech głównych bloków. Są to:

- blok deklaracji,
- wprowadzania danych,

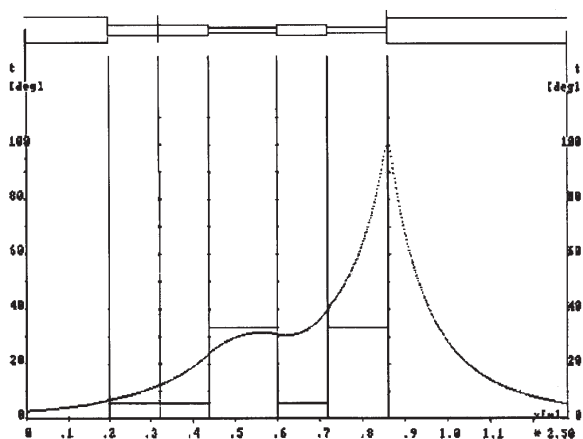
- rysowania grafiki,
- obliczeń i wydruków.

Przedmiotem obliczeń były tory prądowe wykonane z miedzi i aluminium, o różnych kształtach i wartościach przekrojów poprzecznych. W celu sprawdzenia prawidłowości działania programu rozpatrzono przypadki torów prądowych bez zestyków i z jednym zestykiem, dla których znane są zależności na przyrosty temperatury [3, 4]. Analizowano również bardziej złożone konfiguracje odosobnionych torów prądowych. Przykładowe wydruki rozkładów temperatur wzdłuż wybranych torów, uzyskane przy wykorzystaniu metody lokalnych źródeł ciepła, przedstawiono na rysunku 3. i 4.

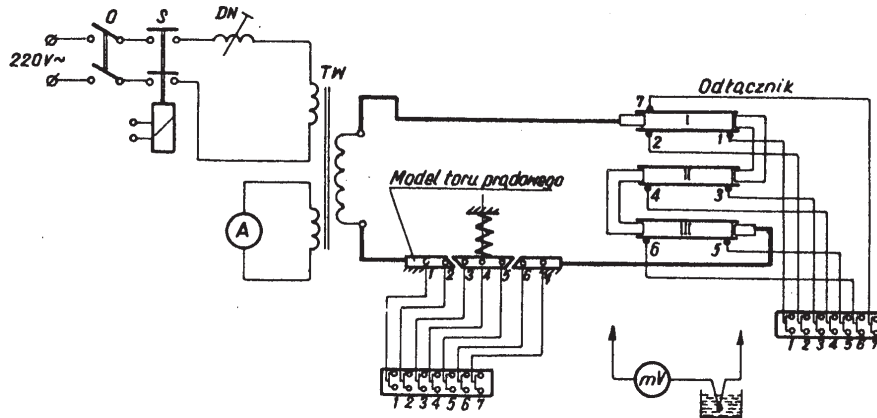
W celu sprawdzenia poprawności obliczeń teoretycznych przyrostów temperatury w torach prądowych określonych przedstawioną metodą przeprowadzono badania nagrzewania odłącznika średniego napięcia i modelu dwuprzerwowego układu stykowego (rys. 5).



Rys. 3. Tor prądowy bez zestyków o różnych przekrojach przewodów, miedziany; * – mnożnik skali



Rys. 4. Tor prądowy o różnych przekrojach przewodów z jednym zestykiem, aluminiowy; * – mnożnik skali



Rys. 5. Schemat układu do próby nagrzewania torów prądowych;
O – odtacznik, *S* – stycznik, *DN* – dławik nastawczy, *TW* – transformator wielkopiętowy,
A – amperomierz, *mV* – miliwoltomierz

Tabela 1

Wyniki obliczeń teoretycznych oraz pomiarów przyrostów temperatury w badanych zestykach

I [A]	Odtacznik, $F_k = 580 \text{ N}$		Układ zestykowy, $F_k = 1923 \text{ N}$	
	$\tau_{xi} [^{\circ}\text{C}]$		$\tau_{xi} [^{\circ}\text{C}]$	
	pom.	obl.	pom.	obl.
1000	43.1	41.5	36.1	34.9
800	27.6	26.7	19.7	18.9
630	17.2	16.8	11.7	11.8

Zestaw taki poddano próbie nagrzewania prądami ciągłymi o wartościach od 630 A do 1000 A przy kilku wybranych siłach F_k dociskających styki badanych układów, a mianowicie: 580 N i 1923 N. Wartości średnie wyników otrzymanych z pomiarów w pobliżu zestyków oraz wyniki obliczeń teoretycznych przyrostów temperatury podano w tabeli 1.

Przedstawione wyniki badań wskazują na dosyć dużą zgodność wyników pomiarów z obliczeniami, a także na praktyczną możliwość wykorzystania metody lokalnych źródeł ciepła w projektowaniu torów prądowych z zestykami.

4. WNIOSKI

- a) Przedstawiona metoda modelowania zjawisk cieplnych w torach prądowych umożliwia:
- wyznaczanie obciążalności prądowej układów złożonych, zwłaszcza torów niejednorodnych tworzących ciągi szyn, zestyków i rozpraszaczy ciepła (radiatorów),
 - analizę rozkładu temperatury w torach prądowych,
 - ustalenie wymaganej mocy dodatkowo rozpraszanej przy pomocy rozpraszaczy ciepła w danym miejscu toru.

- b) Wyniki obliczeń przyrostów temperatury w analizowanych torach prądowych są dostatecznie zgodne z wynikami przeprowadzonych badań.
- c) Przebieg obliczeń rozkładu temperatury w torach prądowych wskazuje na przydatność metody w projektowaniu ciągów szynowych oraz torów prądowych aparatów elektrycznych i rozdzielnic.

Literatura

1. Braunowicz M. i in.: *Electrical contacts*, CRC Press, London, New York 2006.
2. Ciok Z.: *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 1983.
3. Kulas S.: *Tory prądowe i układy zestykowe*, OWPW, Warszawa 2008.
4. Kulas S.: *Calculation of temperature gain in current circuit with contact*, Proceedings of the V International Conference „Kontakttronika”, Bydgoszcz 1985.
5. Lathi B.: *Teoria sygnałów telekomunikacyjnych*, PWN, Warszawa 1970.
6. Maksymiuk J.: *Aparaty elektryczne*, WNT, Warszawa 1992.
7. Zalesskij A. M., Kukiełow F. A.: *Tieplowye rascoty elektriczeskich apparatow*, Energia, Leningrad 1967.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów