

Sposób wyznaczania obciążalności ciągłej torów prądowych z zestykami i rozpraszaczami ciepła

Stanisław Kulas

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), obciążalności długotrwałej całego toru decyduje układ zestykowy.

Wyznaczanie obciążalności prądowej torów prądowych może być realizowane między innymi takimi metodami, jak [2, 3, 7, 8]: 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 energoelektronicznych. 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 pracy 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

Streszczenie: Wyznaczanie obciążalności prądowej ciągłej torów prądowych jednorodnych jest realizowane na ogół za pomocą 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 pracy przedstawiono sposób obliczania przyrostów temperatury wzdłuż toru prądowego z zestykami i rozpraszaczami ciepła, a także podano wyniki pomiarów przyrostów temperatury w badanych torach prądowych.

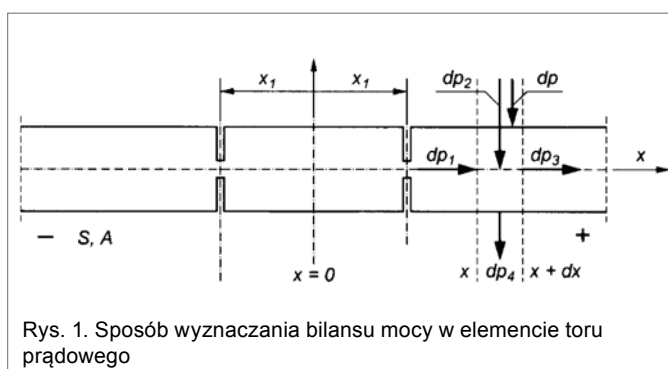
Słowa kluczowe: Tory prądowe, obciążalność prądowa ciągła.

AMPACITY OF THE CURRENT CARRYING PATHS WITH CONTACT SYSTEMS AND RADIATORS

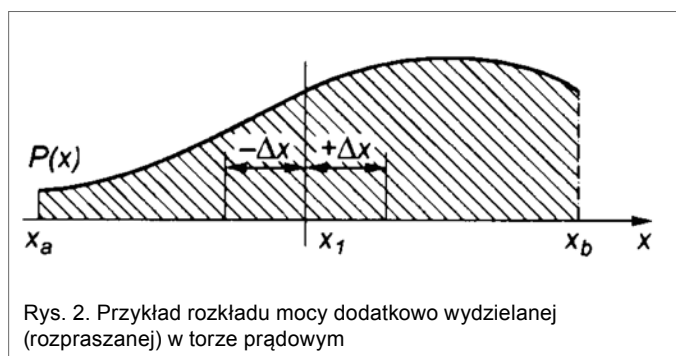
Abstract: Determination the ampacity of the current homogeneous paths is usually realize by thermal balance. In practice, in the current carrying paths occur changes of cross-section, additionally heat source (radiators) and dielectric isolation. In this paper the way of the calculation of the temperature rise along the current carrying paths, using the local source o heating and experimental results tests are presented.

wych niskiego i średniego napięcia odległości między zestykami (rozpraszaczami ciepła) są niewielkie i niejednakowe, a ponadto nieznana jest z reguły funkcja wydzielania ciepła wzdłuż zestyków (rozpraszaczy), co znacznie utrudnia wyznaczenie 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



Rys. 1. Sposób wyznaczania bilansu mocy w elemencie toru prądowego



toru w temperaturze ϑ oraz obwodzie przekroju poprzecznego A danego elementu i stałym współczynnikiem oddawania ciepła k , a także współczynnikiem wypierania prądu k_w , przez który przepływa prąd I o niezmienniej wartości, rozszerzone o składnik mocy wydzielanej przez dodatkowe źródło ciepła lub rozpraszanej na odcinku dx , w jednostce czasu (rys. 1) [3, 4, 5].

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

$$\frac{d^2 \vartheta}{dx^2} - \frac{kA}{\lambda S} (\vartheta - \vartheta_0) + \frac{I^2 \rho_g k_w}{S^2 \lambda} + \frac{p(x)}{\lambda S} = 0$$

gdzie:

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

Oznaczając przyrost temperatury przez $\tau = \Delta\vartheta - \vartheta_0$ 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 [6], otrzymano kolejno zależności:

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

$$\frac{d^2 \tau}{dx^2} - \frac{kA}{\lambda S} (\tau - \vartheta_0) + \frac{I^2 \rho_g k_w}{S^2 \lambda} + \frac{P_A}{\lambda S} \delta(x - x_1) - \frac{P_B}{\lambda S} \delta(x - x_2) = 0$$

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 zamocowany w odległości x_2 a dopuszczalnym przyrostem temperatury z 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. Obliczenia 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. Rozpatrzono przypadki torów prądowych bez zestyków i z jednym zestykiem, dla których znane są zależności na przyrosty temperatury [3, 4], w celu sprawdzenia prawidłowości programu. Analizowano również bardziej złożone konfiguracje odosobnionych torów prądowych. Przykładowe wydruki rozkładów temperatur wzdłuż wybranych torów, uzyskane przy wykorzystaniu metody lokalnych źródeł ciepła, przedstawiono na rys. 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).

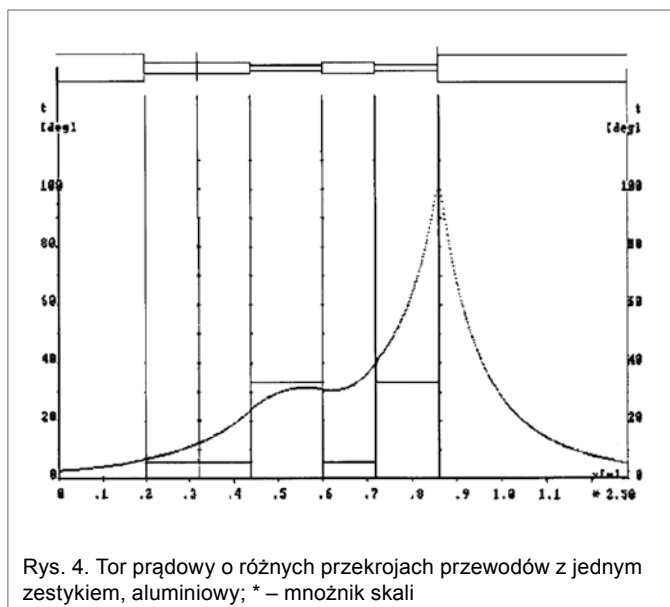
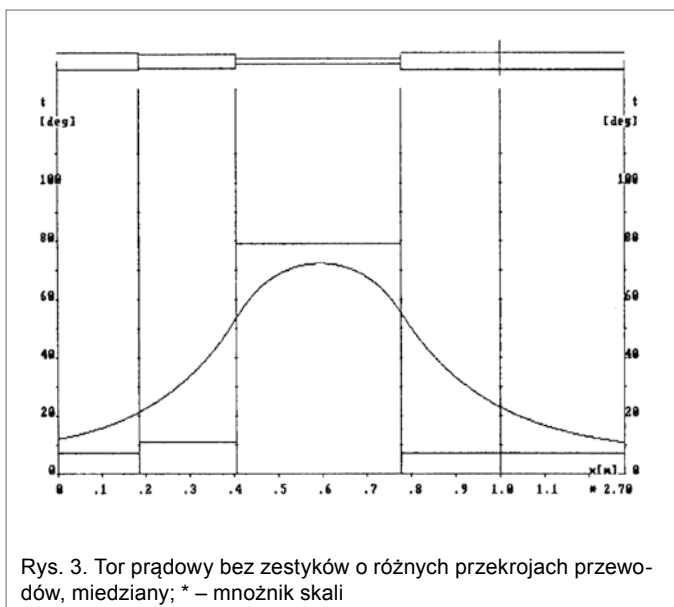


Tabela 1. Wartości średnie teoretycznych oraz zmierzonych przyrostów temperatury w badanych zestykach

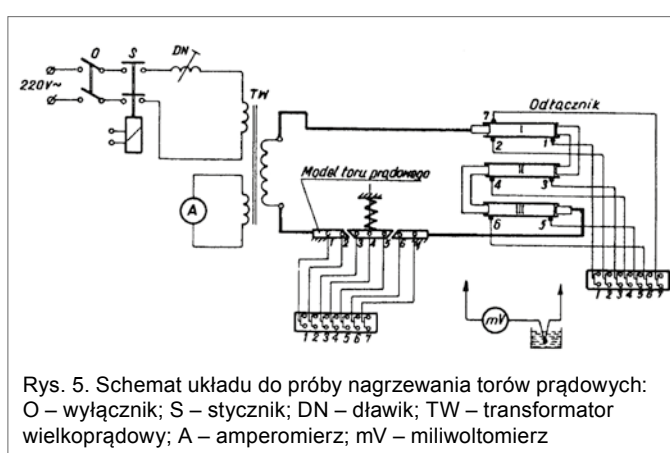
I [A]	Wyłącznik, $F_k = 580 \text{ N}$		Układ zestykowy, $F_k = 1923 \text{ N}$	
	$\tau_{x1} [0C]$		$\tau_{x1} [^{\circ}C]$	
	pom.	obl.	pom.	obl.
1000	43,1	41,5	36,1	34,9
800	27,6	26,7	19,7	18,9
630	17,2	16,8	11,7	11,8

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 wartości średnie obliczeń teoretycznych przyrostów temperatury podano w tabeli 1.

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

4. Wnioski

- 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.
- Wyniki obliczeń przyrostów temperatury w analizowanych torach prądowych są zbliżone do wyników przeprowadzonych badań.
- Przebieg obliczeń rozkładu temperatury w torach prądowych wskazuje na przydatność metody w projektowaniu ciągów szynowych oraz torów prądowych aparatów elektrycznych i rozdzielnic.



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

5. Literatura

- BRAUNOWIC M. I INNI: *Electrical contacts*, CRC Press, London–New York 2006.
- CIOK Z.: *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa 1983.
- KULAS S.: *Tory prądowe i układy zestykowe*, OWPW, Warszawa 2008.
- KULAS S.: *Calculation of temperature gain in current circuit with contact*, Proceedings of the V International Conference „Kontakttronika”, Bydgoszcz 1985.
- KULAS S.: *Analiza wyznaczania obciążalności ciągłej torów prądowych z zestykami i rozpraszaczami ciepła*, „Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa”, Czasopismo Naukowo-Techniczne, PL ISSN 0208-7448, Katowice 2012, 8/498, str. 11–14.
- LATHI B.: *Teoria sygnałów telekomunikacyjnych*, PWN, Warszawa 1970.
- MAKSYMUK J.: *Aparaty elektryczne*, WNT, Warszawa 1992.
- ZALESKIJ A.M., KUKIEKOW F.A.: *Tieplowyye rascoty elektriczeskich apparatow*, Energia, Leningrad 1967.

Stanisław Kulas – Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki

artykuł recenzowany