

Gerard BARTODZIEJ

Wiktor KIŚ

WYZNACZANIE OBCIĄŻALNOŚCI PRĄDOWEJ TORÓW PRĄDOWYCH W URZĄDZENIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

Streszczenie. Przedstawiono dwa modele termokinetyczne opisujące nagrzewanie toru prądowego. Sformułowano algorytm obliczeń numerycznych obciążalności roboczej toru prądowego, z uwzględnieniem nieliniowości parametrów.

1. Wprowadzenie

Zagadnienie racjonalnego wykorzystania obciążalności torów prądowych zarówno przy projektowaniu, jak i eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych posiada duże znaczenie ekonomiczne. Tory prądowe urządzeń elektroenergetycznych (np. szyn zbiorczych, wyłączników, odłączników, żyły kabli, przewody linii napowietrznych) cechuje wielkość umowna, zwana obciążalnością prądową długotrwałą, a w odniesieniu do aparatów elektrycznych prądem znamionowym ciągłym. Obciążalność prądową długotrwałą toru definiuje się jako natężenie prądu długotrwałego, przy którym tor prądowy osiąga temperaturę dopuszczalną długotrwałą, w określonych warunkach otoczenia (determinujących wymianę ciepła między torem a otoczeniem).

Jest oczywiste, że w praktyce stosunkowo rzadko występuje zbiór warunków określających obciążalność długotrwałą:

- prądy robocze nie są prądami długotrwałymi o niezmiennym natężeniu,
- temperatura otoczenia różni się od przyjętej przy wyznaczaniu obciążalności,
- warunki otoczenia (warunki wymiany ciepła) różnią się od znamionowych.

Zachodzi zatem potrzeba praktycznego wyznaczania obciążalności prądowej torów w rzeczywistych warunkach ich eksploatacji. Zestawienie podstawowych zależności i metod umożliwiających wyznaczanie obciążalności torów prądowych jest celem niniejszego artykułu.

2. Podstawowe zależności teoretyczne

Obciążalność długotrwałą toru może być określona z bilansu energetycznego dla odcinka toru i wyrażona zależnością:

$$I_{dd} = \sqrt{\frac{\Delta \psi_{dd}}{R S_z}} \quad (1)$$

lub w odniesieniu do warunków znamionowych (ψ_{ddn}^* , ψ_{on}^* , R_n , S_{zn}):

$$I_{dd} = I_{ddn} \sqrt{\frac{\Delta \psi_{dd}}{\Delta \psi_{ddn}^*}} \sqrt{\frac{R_n}{R}} \sqrt{\frac{S_{zn}}{S_z}}, \quad (2)$$

czyli:

$$I_{dd} = I_{ddn} \sqrt{\frac{(\psi_{dd}^* - \psi_o^*)(1 + \alpha \psi_{ddn}^*)}{(\psi_{ddn}^* - \psi_{on}^*)(1 + \alpha \psi_{dd}^*)}} \sqrt{\frac{S_{zn}}{S_z}} \quad (3)$$

gdzie:

- S_z - zastępczy opór cieplny między torem a otoczeniem,
- α - temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji toru,
- ψ_o^* - rzeczywista temperatura otoczenia,
- ψ_{on}^* - znamionowa temperatura otoczenia,
- ψ_{dd}^* - dopuszczalna długotrwałe temperatura nagrzewania toru,
- ψ_{ddn}^* - znamionowa, dopuszczalna długotrwałe temperatura nagrzewania toru,
- R_n - rezystancja toru w temperaturze ψ_{ddn}^* ,
- R - rezystancja toru w temperaturze ψ_{dd}^* ,
- $\Delta \psi_{dd}^* = \psi_{dd}^* - \psi_o^*$ - dopuszczalny długotrwałe przyrost temperatury toru.

Zwykle zakłada się: $\psi_{dd}^* \leq \psi_{ddn}^*$ pod rygorem:

- przyspieszonego starzenia izolacji urządzenia,
- przyspieszonej rekrytalizacji materiału toru prądowego,
- przyspieszonej degradacji zestyków znajdujących się w torze.

3. Obciążalność robocza toru prądowego

Tor prądowy wykazujący rzeczywistą obciążalność długotrwałą I_{dd} obciążony jest prądem roboczym o przebiegu $I(t)$. Tor prądowy posiada wystarczającą obciążalność roboczą dla prądu $I(t)$, jeśli najwyższa temperatura osiągana przez tor prądowy ψ_m^* nie przekracza wartości dopuszczalnej długotrwałe ψ_{dd}^* .

Zatem:

$$\psi_m^* \leq \psi_{dd}^*$$

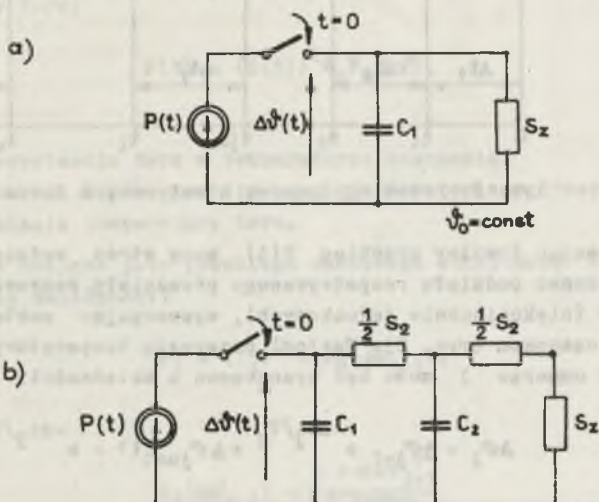
Powstaje problem wyznaczania przebiegu czasowego temperatury toru $\psi^*(t)$ odpowiadającego prądowi robocznemu o wartości skutecznej $I(t)$.

Rozpatrując tor prądowy jako układ termokinetyczny można przyjąć dwa podstawowe modele termokinetyczne:

I - Model ciała jednorodnego, jeśli pojemność cieplna toru (żyły) jest znacznie większa od pojemności cieplnej elementów znajdujących się pomiędzy torem a otoczeniem (izolacja powłoki, osłony, obudowy). Warunek ten zachodzi dla przewodów i szyn nieosłoniętych kabli nn i SN, odłączników, dźwików zwarciovych. Schemat zastępczy cieplny, odpowiadający temu modelowi, pokazuje rys. 1. Pojemność C_1 jest pojemnością cieplną części przewodzących, opór S_z odpowiada przepływowi ciepła z powierzchni toru do otoczenia.

II - Model ciała złożonego z dwóch części, z których pierwsza (części przewodzącej) posiada pojemność cieplną C_1 i pomijalny opór cieplny, a drugą (np. izolację) cechuje pojemność cieplna C_2 oraz opór cieplny S_2 . Opór S_z określa wymianę ciepła między powierzchnią zewnętrzną toru a otoczeniem. Model ten odpowiada w przybliżeniu kablom WN w powietrzu, wyłącznikom, przewodom osłoniętym.

Wyznaczenie przebiegu $\dot{v}(t)$, odpowiadającego prądowi $I(t)$, może być oparte - dla obu modeli - na znajomości odpowiedzi układów z rys. 1 na skokowe wymuszenie $P_1(t)$ przy warunkach początkowych $t = 0$, $\Delta\dot{v}(t) = \Delta\dot{v}_0$.



Rys. 1. Zastępcze schematy cieplne torów prądowych

a) tor prądowy traktowany jako ciało jednorodne, b) tor prądowy traktowany jako ciało złożone z 2 elementów

Dla modelu ciała jednorodnego (rys. 1a) uzyskuje się znaną zależność:

$$\Delta v^{\nu}(t) = \Delta v_0^{\nu} e^{-t/T} + \Delta v_{ust}^{\nu} (1 - e^{-t/T}) \equiv \Delta v_{ust}^{\nu} - (\Delta v_{ust}^{\nu} - \Delta v_0^{\nu}) e^{-t/T} \quad (4)$$

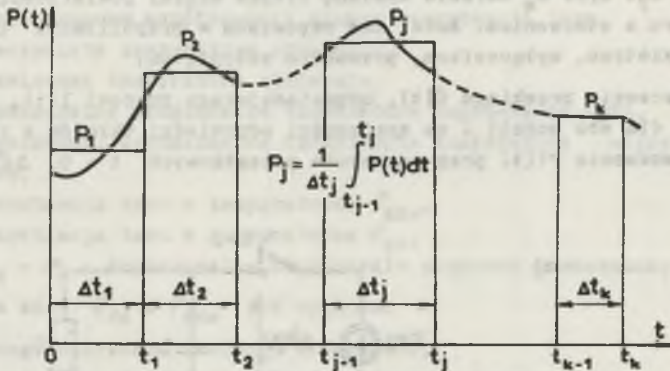
przy czym:

ustalony przyrost temperatury

$$\Delta v_{ust}^{\nu} = PS_z \quad (5)$$

stała czasowa

$$T = S_z C \quad (6)$$



Rys. 2. Przebieg czasowy strat mocy w torze prądowym

Rozważając dowolny przebieg $P(t)$ mocy strat wydzielonych w torze można dokonać podziału rozpatrywanego przedziału czasowego $(0 \dots t_k)$ na k odcinków (niekoniecznie jednakowych), wyznaczając zastępczą moc w każdym odcinku czasowym (rys. 2). Wartość przyrostu temperatury uzyskana w przedziale o numerze j może być wyznaczona z zależności:

$$\Delta v_j^{\nu} = \Delta v_{j-1}^{\nu} e^{-\Delta t_j/T_j} + \Delta v_{just}^{\nu} (1 - e^{-\Delta t_j/T_j}), \quad (7)$$

przy czym:

$$\Delta v_{just}^{\nu} = \Delta v_{dd}^{\nu} \frac{P_j}{P_{dd}} \quad (8)$$

$$T_j = S_{zj} C_j \quad (9)$$

(T_j - stała czasowa wyznaczona dla przyrostu temperatury w przedziale nr j).

Opór cieplny zastępczy S_{zj} jest zależny od temperatury:

$$S_{zj} = S_{z0} F_S(\Delta v_j^*), \quad (10)$$

gdzie:

S_{z0} - opór cieplny w temperaturze otoczenia,

$F_S(\Delta v_j^*)$ - funkcja korekcyjna dla oporu cieplnego, zależna od sposobu wymiany ciepła między torem a otoczeniem.

Zależność pojemności cieplnej C_j od temperatury, związana ze zmianami wartości ciepła właściwego, ujęta jest analogicznie:

$$C_j = C_0 F_C(\Delta v_j^*), \quad (11)$$

gdzie:

C_0 - pojemność cieplna w temperaturze otoczenia,

$F_C(\Delta v_j^*)$ - funkcja korekcyjna dla pojemności cieplnej.

Przy analizie nagrzewania torów prądowych jako wielkość zadaną przyjmuje się zwykle przebieg czasowy prądu $I(t)$. Straty mocy $P(t)$ są zależne od temperatury toru:

$$P(t) = (I(t))^2 R_0 F_R(\Delta v^*), \quad (12)$$

gdzie:

R_0 - rezystancja toru w temperaturze otoczenia,

$F_R(\Delta v^*)$ - funkcja korekcyjna dla uwzględnienia zmiany rezystancji przy zmianie temperatury toru.

Rozpatrując odcinek j -ty przebiegu czasowego strat mocy w torze (rys. 2) uzyskuje się zależności:

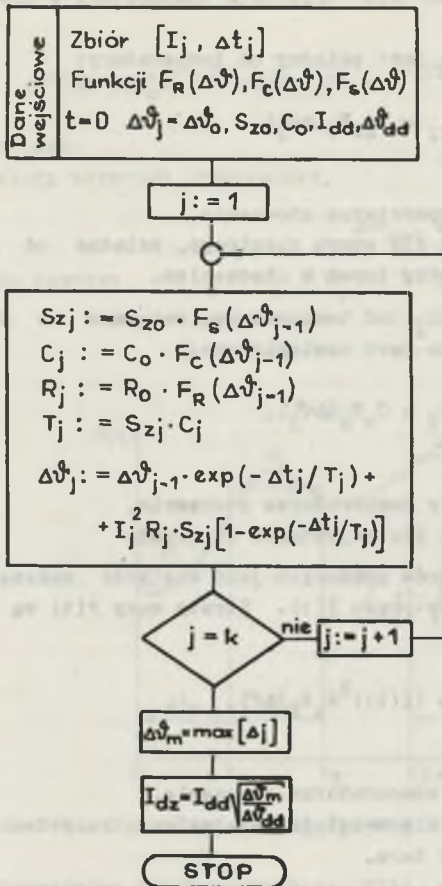
$$P_j = (I_j)^2 R_0 F_R(\Delta v_{j-1}^*), \quad (13)$$

przy czym:

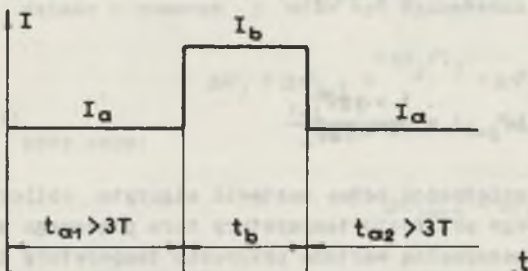
$$F_R(\Delta v_{j-1}^*) = \frac{1 + \alpha \Delta v_{j-1}^*}{1 + \alpha \Delta v_0^*} \quad (14)$$

Biorąc pod uwagę powyższe zależności można zestawzić algorytm obliczeń numerycznych przebiegu czasowego przyrostu temperatury toru prądowego pokazany na rys. 3 i wyznaczyć maksymalną wartość przyrostu temperatury toru przy prądzie $I(t)$

$$\Delta v_m = \max[\Delta v_j^*] \quad (15)$$



Rys. 3. Algorytm obliczeń obciążalności roboczej toru prądowego



Rys. 4. Uproszczony przebieg obciążenia roboczego

Dla przebiegu $I(t)$ wyznacza się prąd zastępczy I_d definiowany jako prąd długotrwały wywołujący przyrost temperatury toru o wartości $\Delta\vartheta_m$:

$$I_d = I_{dd} \sqrt{\frac{\Delta\vartheta_m}{\Delta\vartheta_{dd}}} \quad (16)$$

Warunek wystarczającej obciążalności prądowej roboczej toru dla przebiegu $I(t)$ ma postać:

$$I_d \leq I_{dd} \quad (17)$$

Analiza obciążalności roboczej toru, przeprowadzona dla uproszczonego przebiegu obciążenia roboczego, np. pokazanego na rys. 4, umożliwia wyznaczenie charakterystyk obciążalności dorywczej urządzenia (I_{ddor}):

$$\frac{I_{ddor}}{I_{dd}} = f\left(\frac{I_a}{I_{dd}}, t_b\right) \quad (18)$$

(przeciążenie prądowe dorywcze, tzn. krótkotrwałe przekroczenie wartości prądu dopuszczalnego długotrwałe nie musi być jednoznaczne z przeciążeniem cieplnym, czyli z osiągnięciem $\vartheta' > \vartheta_{dd}'$). Rozpatrywany przedział czasowy należy również i w tym przypadku (rys. 4) podzielić na znaczną ilość odcinków (np. 20...30) z uwagą na potrzebę uwzględnienia

nieliniowości rezystancji, oporów cieplnych i pojemności cieplnych układu.

Analogiczny tok postępowania można zaproponować również dla przypadku toru odwzorowywanego za pomocą modelu ciała złożonego z dwóch części (rys. 1b). Adaptacja algorytmu obliczeń polega na uwzględnieniu, że zamiast zależności (4) wprowadza się zależność (19), odpowiednią dla układu wg rys. 1b:

$$\Delta v^{\nu}(t) = \Delta v^{\nu}_{ust} - (\Delta v^{\nu}_{ust} - \Delta v^{\nu}_0) e^{-\xi t} \left\{ \text{ch } \beta t + \frac{1}{\beta} \left[\xi - \frac{1}{C_1(S_2 + S_z)} \right] \text{sh } \beta t \right\} \quad (19)$$

przy oznaczeniach:

$$\Delta v^{\nu}_{ust} = P(S_2 + S_z) \quad (20)$$

$$\xi = \frac{1}{C_1 S_2} + \frac{1}{C_2 S_2} + \frac{1}{2C_2 \left(\frac{S_2}{2} + S_z \right)} \quad (21)$$

$$\beta = \sqrt{\xi^2 - \frac{2}{C_1 C_2 S_2 \left(\frac{S_2}{2} + S_z \right)}} \quad (22)$$

Obliczenia stają się przez to bardziej złożone, zwłaszcza że wzrasta również ilość funkcji korekcyjnych.

4. Doświadczalne wyznaczenie parametrów cieplnych toru prądowego

Obliczenie funkcji korekcyjnych dla uwzględnienia zależności oporu cieplnego toru i jego pojemności cieplnej od temperatury jest możliwe dla niektórych prostych przypadków. Wymaga to jednak wnikliwego przeanalizowania warunków wymiany ciepła i może być obciążone dość znacznymi błędami, wynikającymi z konieczności oszacowania niektórych parametrów (np. emisyjności powierzchni).

Korzystniejsze jest doświadczalne wyznaczenie funkcji korekcyjnych w oparciu o proste pomiary nagrzewania; zdjęcie charakterystyki $\Delta v^{\nu}(t)$ dla kilku - kilkunastu wartości prądu długotrwałego I_d i wyznaczenie oporu cieplnego z zależności:

$$S_z(\Delta v^{\nu} = \Delta v^{\nu}_{ust}) = \frac{\Delta v^{\nu}_{ust}}{I_d^2 R} \quad (23)$$

Wykres $S_z = f(\Delta\vartheta)$ umożliwia wyznaczenie funkcji korekcyjnej $F_s(\Delta\vartheta)$:

$$F_s(\Delta\vartheta) = \frac{S_z(\Delta\vartheta)}{S_{z0}} \quad (24)$$

Korekcja pojemności cieplnej zależy od przyrostu temperatury może być oparta o doświadczalnie wyznaczone stałe czasowe przebiegów nagrzewania.

W większości przypadków możliwe jest przyjęcie funkcji korekcyjnej $F_c(\Delta\vartheta) = 1$ wobec stosunkowo słabej zależności ciepła właściwego miedzi i aluminium od temperatury w przedziale temperatur 20...100°C.

5. Podsumowanie

W opracowaniu sformułowano algorytm obliczeń numerycznych obciążalności roboczej toru prądowego przy dowolnym przebiegu prądu $I(t)$. Umożliwia on wyznaczenie m.in. charakterystyk obciążalności dorywczej toru, z uwzględnieniem nieliniowości rezystancji, oporów cieplnych i pojemności cieplnych, względem temperatury.

LITERATURA

- [1] Włodarski B., Bucholc J.: Linie kablowe bardzo wysokich napięć. Projektowanie i budowa. WNT, Warszawa 1979.
- [2] Staniszewski B.: Wymiana ciepła. Podstawy teoretyczne. PWN, Warszawa 1979.
- [3] Maksymiuk A.J., Pochanke Z.: Podstawy obliczeń aparatów elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 1976.
- [4] Markiewicz H., Wołkowiński K.: Urządzenia elektroenergetyczne. WNT, Warszawa 1980.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zbigniew Kowalski

Wpłynęło do redakcji dnia 24.VII.1982 r.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОЙ НАГРУЗКИ ТОКОВЕДУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

Резюме

В статье представлено две термокинетические модели токоведущих элементов. Определён алгоритм численных расчётов рабочей нагружаемости токоведущих элементов с учётом нелинейности параметров.

THE DETERMINATION OF THE CURRENT LOAD IN BUSBARS

Summary

Two termokinetic models of heating of current load in busbars are proposed. Moreover the algorithm of numerical calculation on the working load of a busbar, taking into account the parameter non-linearity is presented.