

GERARD BARTODZIEJ

Katedra Elektrotechniki Przemysłowej

OBCIĄŻALNOŚĆ DŁUGOTRWAŁA PRZEWODÓW SZYNOWYCH
PRZESŁANKI NOWELIZACJI NORMY PN-56/E-05020

Streszczenie. Rozpatrzono czynniki wpływające na obciążalność długotrwałą przewodów szynowych. Podano propozycje zmian w normie PN-56/E-05020.

1. Obliczanie obciążalności długotrwałej przewodów szynowych

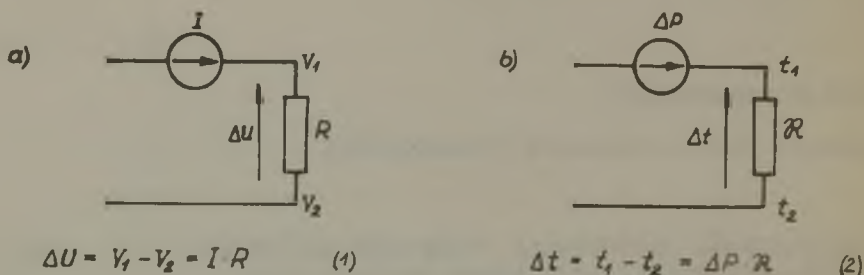
Obciążalność długotrwałą przewodu określa się jako natężenie prądu przepływającego długotrwałe, wywołującego nagrzanie przewodu do temperatury dopuszczalnej długotrwałe. Obciążalność długotrwałą przewodu można wyznaczyć na podstawie bilansu cieplnego przewodu w stanie cieplnym ustalonym.

Posługując się analogiami między zależnościami w obwodach elektrycznych (1) i zależnościami określającymi przepływ ciepła (2) można przypisać procesowi przepływu ciepła schematy zastępcze, podobne do schematów elektrycznych, przydatne przy analizie obciążalności długotrwałej przewodów (rys. 1a i b).

W stanie cieplnym ustalonym przewód oddaje do otoczenia w postaci ciepła moc równą stratom ΔP powstającym na rezystancji R przewodu przy przepływie prądu o natężeniu I .

Zachodzi więc zależność:

$$\Delta P = I^2 R = \frac{\Delta t}{R} \quad (3)$$



Rys. 1. Schematy zastępcze ilustrujące prawo Ohma dla przepływu prądu elektrycznego i przepływu mocy cieplnej

Oznaczenia:

ΔP - moc cieplna przepływająca między przewodem o temperaturze t_1 a otoczeniem o temperaturze t_2 wyrażona w [W]

Δt - przyrost temperatury przewodu ponad temperaturę otoczenia [deg]

R - opór cieplny $\left[\frac{\text{deg}}{\text{W}}\right]$

Przyjmując dopuszczalną wartość przyrostu temperatury przewodu t_1 ponad temperaturę otoczenia t_2 , wynoszącą Δt_{dd} , określić można obciążalność długotrwałą przewodu: I_{dd} :

$$I_{dd} = \sqrt{\frac{\Delta t_{dd}}{R R}} \quad [\text{A}] \quad (4)$$

Opór cieplny R dla przepływu ciepła z przewodu do otoczenia zależy od budowy przewodu i warunków w miejscu zainstalowania. Wartości oporów cieplnych (szczególnie dla przepływu ciepła drogą promieniowania i konwekcji) zależą ponadto w pewnym stopniu od temperatury przewodu i otoczenia. Opory cieplne mają więc w ogólnym przypadku charakter nieliniowy.

Dla przewodów szynowych nieosłoniętych, oddających ciepło do otoczenia przez konwekcję i promieniowanie można określić

ciepły schemat zastępczy, przedstawiony na rys. 2 i wyznaczyć opór zastępczy wg zależności (5):

Opory dla przepływu ciepła przez promieniowanie R_ϵ oraz konwekcję R_k można wyznaczyć ze wzorów:

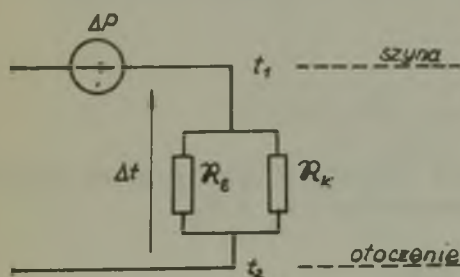
$$R_\epsilon = \frac{1}{\alpha_\epsilon F_\epsilon} \left[\frac{\text{deg}}{\text{W}} \right] \quad (6)$$

$$R_k = \frac{1}{\alpha_k F_k} \left[\frac{\text{deg}}{\text{W}} \right] \quad (7)$$

przy czym:

F_ϵ, F_k - powierzchnie wymiany ciepła przez promieniowanie i konwekcję $[\text{m}^2]$

$\alpha_\epsilon, \alpha_k$ - współczynniki wymiany ciepła przez promieniowanie i konwekcję $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ deg}} \right]$



$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_\epsilon} + \frac{1}{R_k} \quad (5)$$

Rys. 2. Zastępczy schemat ciepły przewodu szynowego nieosłoniętego

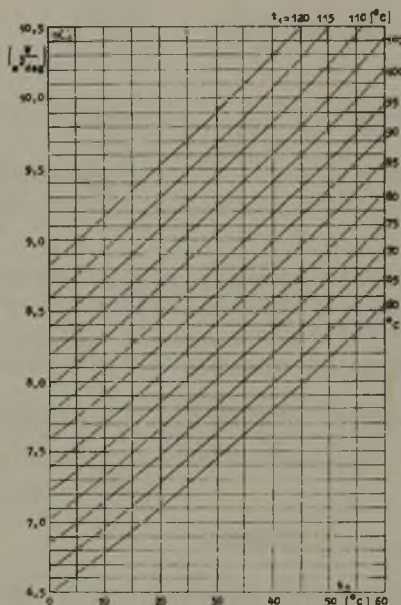
Oznaczenia:

R_ϵ - opór dla przepływu ciepła przez promieniowanie $\left[\frac{\text{deg}}{\text{W}} \right]$

R_k - opór dla przepływu ciepła przez konwekcję $\left[\frac{\text{deg}}{\text{W}} \right]$

R - opór cieplny wypadkowy $\left[\frac{\text{deg}}{\text{W}} \right]$

Wartości współczynników wymiany ciepła dla promieniowania i konwekcji można określić na podstawie zależności analitycznych podanych w literaturze dotyczącej wymiany ciepła [1] [2] lub wykresów podanych na rys. 3 i 4.



Rys. 3. Zależność współczynnika oddawania ciepła przez promieniowanie od temperatur t_1 i t_2

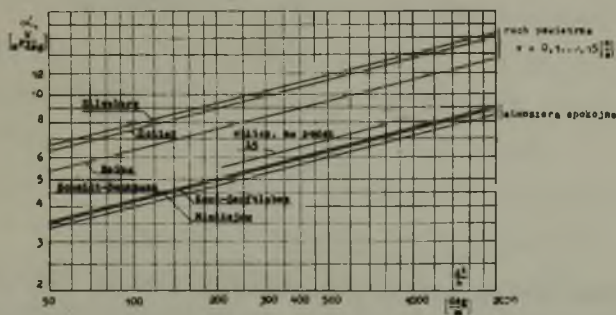
$$\alpha_{\varepsilon} = \varepsilon \alpha'_{\varepsilon}$$

$\varepsilon = 0,04-0,07$ dla aluminium polerowanego, wytrawionego lub odwalcowanego na błyszcząco

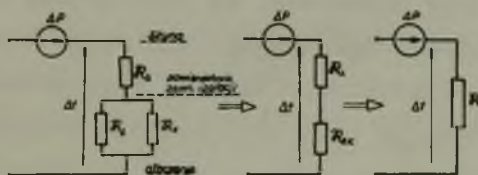
$\varepsilon = 0,80-0,98$ dla powierzchni malowanych

Pokrycie przewodu szynowego warstwą izolacji może zmienić wypadkowy opór cieplny dla przepływu ciepła z przewodu do otoczenia; Schemat cieplny przewodu szynowego izolowanego oddajają-

cego ciepło przez promieniowanie i konwekcję podano na rys. 5. Warto przy tym zaznaczyć, że opory cieplne dla przewodu szynowego izolowanego mogą być mniejsze niż dla przewodu nieosłoniętego o tym samym przekroju i ukształtowaniu z uwagi na zwiększoną powierzchnię wymiany ciepła z przewodu izolowanego.



Rys. 4. Zależność współczynnika wymiany ciepła przez konwekcję naturalną dla płaszczyzny pionowej o wysokości h



$$R = R_i + \frac{R_i \cdot R_e}{R_i + R_e} = R_i + R_{ec} \quad (8)$$

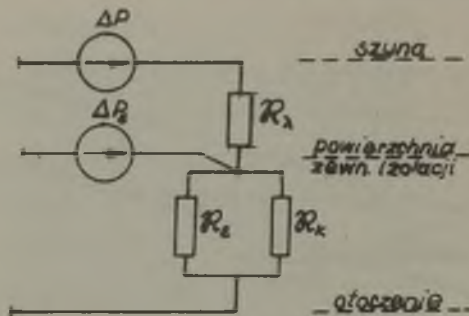
$$R_i = \frac{a}{\lambda \cdot F_s} \quad (9)$$

Rys. 5. Zastępczy schemat cieplny przewodu szynowego pokrytego warstwą izolacji o grubości a i przewodności cieplnej λ

Oznaczenia:

- R_{λ} - opór cieplny dla przewodzenia $\left[\frac{\text{deg}}{\text{W}} \right]$
- λ - przewodność cieplna izolacji $\left[\frac{\text{W}}{\text{m deg}} \right]$
- a - grubość izolacji [m]

Poddanie przewodu szynowego działaniu promieniowania zewnętrznego źródła ciepła np. słońca wpływa oczywiście na jego obciążalność długotrwałą. Ilustruje to schemat cieplny przedstawiony na rys. 6 z którego można łatwo uzyskać zależności dla wyliczenia obciążalności długotrwałej przewodu.



Rys. 6. Zastępczy schemat cieplny przewodu jak na rys. 5, lecz poddanego dodatkowo działaniu promieniowania słonecznego i dostarczającego do przewodu mocy cieplnej ΔP_s

Wyżej podane zależności mogą służyć do wyliczenia obciążalności długotrwałej przewodów, co jest jednak w praktyce ograniczone trudnościami w wyznaczeniu wartości oporów cieplnych, szczególnie dla konwekcji. Częściej więc powyższe wzory i schematy mogą być pomocne przy przeliczeniu obciążalności przewodu znanej w konkretnych warunkach, przy zmianie tych warunków.

2. Dopuszczalny przyrost temperatury przewodów szynowych

Wartość dopuszczalnego długotrwałe przyrostu temperatury przewodu szynowego ograniczona jest:

- wpływem temperatury na procesy rekrytalizacji materiału przewodów szynowych, powodujące obniżenie ich wytrzymałości mechanicznej,
- wpływem temperatury na pracę złączy stykowych

- warunkami współpracy przewodu szynowego z aparaturą rozdzielczą.

Obowiązująca dotychczas norma PN-56/E-05020 określa wartość temperatury dopuszczalnej długotrwanie dla przewodów szynowych wynoszącą 70°C.

Z przeprowadzonej przez autora analizy porównawczej [3] wynika możliwość podwyższenia temperatury dopuszczalnej długotrwanie dla przewodów szynowych aluminiowych do 80°C, bez zmiany wymagań określonych w obowiązujących normach stawianych aparaturze współpracującej z przewodami szynowymi.

Podwyższenie temperatury dopuszczalnej długotrwanie pozwoliłoby zwiększyć obciążalność przewodów szynowych o ok. 10 do 15% przy temperaturach otoczenia $t_2 = 25 \dots 40^\circ\text{C}$, co pociągnęłoby za sobą praktycznie zmniejszenie w zbliżonych granicach zużycia aluminium na przewody szynowe.

Rozpatrując zależność obciążalności przewodów szynowych od przyrostu temperatury uzyskano w pracy [3] wzór:

$$\frac{I_{dd_1}}{I_{dd_2}} \approx \left(\frac{\Delta t_{dd_1}}{\Delta t_{dd_2}} \right)^{0,58 \dots 0,62} \quad (10)$$

Wykładnik potęgowy we wzorze (10) zależy od ukształtowania przewodu. Podana w normie PN-56/E-05020 zależność z której wynika wzór (11):

$$\frac{I_{dd_1}}{I_{dd_2}} = \left(\frac{\Delta t_{dd_1}}{\Delta t_{dd_2}} \right)^{0,5} \quad (11)$$

ma więc charakter przybliżony.

3. Rezystancja przewodów szynowych

W praktyce może zachodzić potrzeba stosowania przewodów wykonanych z różnych materiałów.

Znając obciążalność I_{dd1} przewodu wykonanego z materiału o rezystywności ρ_1 (np. przewodu z Al 99,5) można wyznaczyć obciążalność I_{dd2} przewodu wykonanego z materiału o rezystywności ρ_2 przy tych samych wymiarach, ukształtowaniu przewodu i warunkach wymiany ciepła:

$$\frac{I_{dd1}}{I_{dd2}} \approx \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} \quad (12)$$

Norma PN-56/E-05020 nie podaje zależności umożliwiającej przeliczenie obciążalności przewodu przy zmianie materiału przewodu.

Poważne wątpliwości budzi podany w wymienionej normie wzór na przeliczenie obciążalności przewodu przy zmianie częstotliwości prądu, który może być napisany w postaci:

$$\frac{I_{dd1}}{I_{dd2}} = \sqrt{\frac{f_2}{f_1}} \quad (13)$$

przy czym:

I_{dd1} - obciążalność przewodu przy częstotliwości f_1

I_{dd2} - obciążalność przewodu przy częstotliwości f_2

Bliższa analiza [3] pozwala uzyskać wzór dokładny:

$$\frac{I_{dd1}}{I_{dd2}} = \sqrt{\frac{k_d(f_2)}{k_d(f_1)}} \quad (14)$$

przy czym:

k_d - współczynnik strat dodatkowych zależny od częstotliwości.

Dla przewodu odosobnionego zachodzi zależność:

$$k_d = k_n \quad (15)$$

gdzie:

k_n - współczynnik naskórkowości.

Analiza zjawiska naskórkowości w przewodach o przekroju prostokątnym [4] prowadzi do przybliżonej postaci zależności współczynnika naskórkowości od częstotliwości, ważnej przy odpowiednio dużej częstotliwości i małej rezystancji przewodu:

$$k_n \approx c \cdot f^{0,5} \quad (16)$$

przy czym:

C - współczynnik zależny od rezystancji i ukształtowania przewodu.

Zależność (14) sprowadza się więc dla odosobnionego przewodu szynowego o przekroju prostokątnym do postaci:

$$\frac{I_{dd1}}{I_{dd2}} \approx \sqrt[4]{\frac{f_2}{f_1}} \quad (17)$$

Oczywiście wyniki uzyskiwane ze wzorów (13) i (14) będą znacznie różnić się między sobą.

Wydaje się koniecznym wyeliminowanie wzoru sprowadzającego się do postaci (13) z normy PN-56/E-05020 - jako pozbawionego podstaw fizykalnych i zastąpienie wzorem (14) przy uwzględnieniu zależności (15).

4. Ułożenie przewodów szynowych

Sposób ułożenia przewodów szynowych w przestrzeni wpływa na ich obciążalność. Ze zmianą warunków ułożenia przewodów zmienia się opór cieplny dla przepływu ciepła z przewodu do otoczenia.

Wynika stąd zależność:

$$\frac{I_{dd1}}{I_{dd2}} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}} \quad (18)$$

przy czym:

I_{dd1} - obciążalność przy oporze cieplnym R_1

I_{dd2} - obciążalność przy oporze cieplnym R_2

W praktyce dokładne wyznaczenie oporów cieplnych dla różnych warunków ułożenia przewodów może być kłopotliwe, a niekiedy wręcz niemożliwe. Wartości wynikające z zależności (18) określa się więc doświadczalnie dla różnych ukształtowań przewodów szynowych i różnych warunków ułożenia i podaje w postaci współczynników korekcyjnych.

Dla najczęściej stosowanych przewodów szynowych o przekroju prostokątnym (płaskowniki) podaje się współczynniki korekcyjne dla obliczenia obciążalności przewodu ułożonego "na płask" przy znanej wartości obciążalności przewodu ułożonego "na żebro" (tj. dłuższym bokiem przekroju prostopadle do płaszczyzny poziomej). W tabelicy 1 przedstawiono wyniki pomiarów autora dla niektórych przewodów i porównano z współczynnikami korekcyjnymi podanymi w różnych źródłach. Podane w normie PN-56/E-05020 wartości współczynników są niższe niż uzyskane przez autora z pomiarów. Uściślenie wartości tych współczynników - co wymagałoby zdaniem autora przeprowadzenie pomiarów również dla innych typów przewodów niż podane w tabelicy 1 - mogłoby prowa-

dzić do lepszego wykorzystania przewodów szynowych i dalej zmniejszenia zużycia materiału przewodowego.

Tablica 1

Zestawienie współczynników korekcyjnych dla przeliczenia obciążalności płaskownika przy zmianie ułożenia, przy $\Delta t = 45$ deg:

Lp.	Rodzaj przewodu źródło	Niemalowany		Malowany			Bull SEV (L7)
		Autor	L5	Autor	L5	GOST	
1	AP 50 x 5	0,96	0,85	0,97	0,90	0,95	0,83
2	AP 100 x 10	0,91	0,85	0,94	0,90		
3	2 x AP 100 x 10 c = 10 mm	0,895	0,80	0,93	0,85	0,92	0,77
4	2 x AP 100 x 10 c = 20 mm	0,93	-	-	-		
5	3 x AP 100 x 10	0,77	0,75	0,815	0,80		

5. Ukształtowanie przewodów szynowych

Obciążalność przewodów szynowych zależy w znacznym stopniu od ich ukształtowania, w związku z zależnością rezystancji i oporów cieplnych od ukształtowania przewodów. Dla najczęściej stosowanych przewodów, złożonych z płaskowników obciążalność zależy od szerokości szczelin między płaskownikami. Zwiększenie szerokości szczelin między płaskownikami w przewodach złożonych z 2 lub 3 płaskowników zwiększa ich obciążalność. I tak, powiększenie szczeliny w przewodzie złożonym z 2 płaskowników AP 100 x 10 do 20 mm zwiększy obciążalność przewodu w granicach 5...8% (wg badań autora [3]).

Zwiększenie szczeliny powoduje również podwyższenie wartości współczynnika korekcyjnego dla zmiany ułożenia (patrz tabl. 1).

Powiększenie szczeliny środkowej w przewodach szynowych złożonych z 4 płaskowników do 50 mm powoduje, że współczynnik strat dodatkowych takiego przewodu ma wartości bliskie wartościom dla przewodu złożonego z 3 płaskowników ($k_d \approx 1,55$ dla przewodu z 3 płaskowników AP 100x10).

Również dopuszczalne gęstości prądu w zmodyfikowanych złożonych z 4 płaskowników są bliskie wartościom charakterystycznym dla przewodów złożonych z 3 płaskowników.

Wobec równoważnych wskaźników charakteryzujących przewody złożone z 3 i 4 płaskowników (ze zwiększoną szczeliną) należałoby przywrócić przewodom złożonym z 4 płaskowników miejsce w normie i dopuścić ich stosowanie. Zmodyfikowana w 1964 r. norma DIN 43670 przewiduje stosowanie takich przewodów.

Szczegółowe wyniki badań zmodyfikowanych przewodów 4 x AP 100x10 zawiera praca [3]

Zdaniem autora zmodyfikowane złożone z 4 płaskowników przewody umożliwiłyby przewodzenie prądów 4...6 kA przy zachowaniu prostej technologii montażu.

6. Podsumowanie wniosków dotyczących normy PN-56/E-05020

- a) Możliwe jest uzyskanie znacznych oszczędności materiału przewodowego (aluminium) drogą korekty wymienionej normy zmierzającej do:
- podwyższenia temperatury dopuszczalnej przewodów szynowych aluminiowych do co najmniej 80°C,
 - uściślenia współczynników korekcyjnych dla przeliczania obciążalności przy zmianie dopuszczalnego przyrostu temperatury przewodów i zmianie sposobu ułożenia przewodów,

- określenia w normie stosowalności przewodów ze zwiększoną szczeliną (dotyczy przewodów złożonych z 2 lub 4 płaskowników).
- b) Wydaje się celowym, zmiana podanego w normie wzoru dla przeliczenia obciążalności przy zmianie częstotliwości, a także wprowadzenie wzoru umożliwiającego przeliczenie obciążalności przy zmianie rezystywności materiału przewodowego.

LITERATURA

- [1] Hobler T.: Ruch ciepła i wymienniki - PWT 1959 r.
- [2] Senftleben H.: Die Wärmeabgabe von Körpern verschiedener Form in Flüssigkeiten und Gasen - Zeitschr. angew. Physik 1951 Nr 3 s. 361-373 - 1953 Nr 5 s. 267-270.
- [3] Bartodziej G.: Obciążalność długotrwała przewodów szynowych nieosłoniętych - Rozprawa doktorska - Gliwice 1969 r.
- [4] Mocanu C.I.: Le calcul de la resistance en alternatif des barres a section polygonale en refoulement net du courant - Revue Roumaine des Sciences Techniques. Ser. electrot. et energet. 1965 Nr 1 s. 79-81.
- [5] PN-56/E-05020: Urządzenia elektroenergetyczne. Wyznaczanie obciążalności szyn sztywnych.
- [6] DIN 43670: Stromschienen aus Aluminium. Bemessung für Dauerstrom.
- [7] Dassetto G.: Aluminium Stromschienen-Bull. SEV - Nr 1 1961 r.

ДОПУСТИМЫЕ ТОКОВЫЕ НАГРУЗКИ ШИНОПРОВОДОВ. ПРЕДПОСЫЛКИ ПЕРЕМЕН
В СТАНДАРТЕ PN-56/E-05020

Р е з ю м е

Рассмотрены факторы влияющие на допустимые токовые нагрузки шипроводов. Представлены предложения перемен в стандарте PN-56/E-05020.

CURRENT CARRYING CAPACITY OF BUS BARS. SUGESTION OF MODIFICA-
TION OF POLISH STANDARD PN-56/E-05020

S u m m a r y

The author considers the parameters which influence the current carrying capacity of bus bars. There are given the suggestions of modification of Polish Standard PN-56/E-05020.