

Edmund PIĘTKA

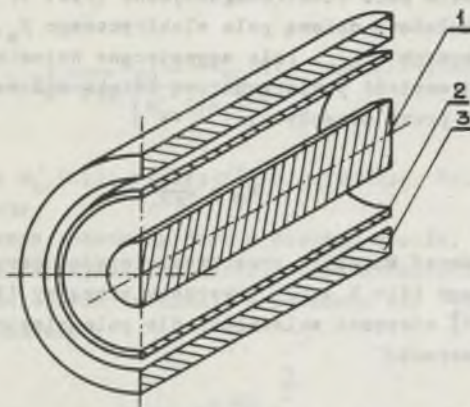
STRATY MOCY W EKRANIE ELEKTROMAGNETYCZNYM KANAŁU KRIOPRZEWODU

Stressczenie. Przedstawiono sposób określania strat mocy czynnej w ekranie elektromagnetycznym kanału krioprzewodu, wyniki obliczeń oraz wyniki pomiarów na modelu fizycznym.

1. Wstęp

Pole elektromagnetyczne wokół przewodnika z prądem powoduje straty energii w postaci ciepła, wytwarzanego w metalowej osłonie termicznej krioprzewodu. Opanowanie skutków cieplnych i energetycznych przy dużej koncentracji pól rozproszonych, działających na stalowe elementy konstrukcyjne krioprzewodu, ma istotne znaczenie dla jego prawidłowej eksploatacji. Jednym ze skutecznych rozwiązań praktycznych zmierzających do zmniejszenia tych strat jest ekranowanie elektromagnetyczne wewnętrznej części osłony termicznej, swanej kanałem krioprzewodu (rys. 1).

Stalową ścianę tego kanału osłania cylindryczny ekran miedziany, w którym straty energii, dzięki dużej konduktywności miedzi, wykazują mniejszą wartość niż w stali.

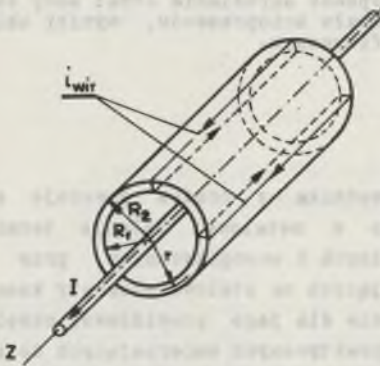


Rys. 1. Ekran elektromagnetyczny w kanale krioprzewodu

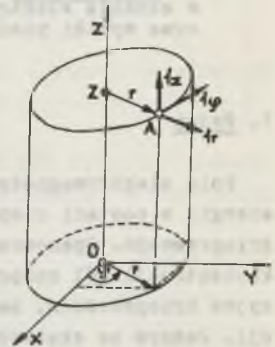
1 - krioprzewodnik, 2 - ekran elektromagnetyczny, 3 - ściana stalowa kanału krioprzewodu

2. Strumień energii elektromagnetycznej w ekranie

Rozpatruje się pole elektromagnetyczne i straty mocy w ekranie cylindrycznym, otaczającym krioprzewodnik, w którym wymuszony jest prąd przemienny 50 Hz. Do rozważań przyjmuje się układ współrzędnych cylindrycznych (rys. 2), którego oś (z) pokrywa się z osią przewodnika i ma kierunek zgodny z kierunkiem prądu w rozpatrywanej chwili.



Rys. 2. Przepływ prądów wirowych i_{wir} w ekranie elektromagnetycznym kanału krioprzewodu



Rys. 3. Układ współrzędnych cylindrycznych

W układzie takim pole elektromagnetyczne (rys. 3) ma we wnętrzu ściany ekranu jedynie składową osiową pola elektrycznego E_z , skierowaną wzdłuż linii prądów wirowych i_{wir} . Pole magnetyczne natomiast ma wyłącznie składową H_ϕ , której wartość powierzchniową dzięki osiowej symetrii układu można obliczyć z prawa przepływu:

$$H_\phi = \frac{\sqrt{2} I}{2\pi R_1} \quad (1)$$

Korzystając z równań Maxwella oraz uwzględniając warunek bezźródłowości pola elektrycznego ($\text{div } E = 0$) i warunek brzegowy (1), można na drodze przekształceń [1] otrzymać zależności dla pola elektrycznego i magnetycznego w ścianie ekranu:

$$\underline{E}_z(r) = H_\phi \sqrt{\omega \mu \rho} \frac{M_{ko}(\alpha r)}{M'_{ko}(\alpha R_1)} e^{j\varphi(\alpha r)} \quad (2)$$

$$\underline{H}(r) = H_{\varphi} \frac{M'_{ko}(\alpha r)}{M'_{ko}(\alpha R_1)} e^{j\left[\varphi'(\alpha r) - \frac{\pi}{2}\right]}, \quad (3)$$

gdzie:

- μ - przenikalność magnetyczna ekranu ($\mu = \text{const}$),
- ρ - rezystywność ekranu,
- R_1 - promień wewnętrzny ekranu,
- r - promień w ścianie ekranu, zawarty w granicach $R_1 \leq r \leq R_2$,
- $M_{ko}(\alpha r)$; $M'_{ko}(\alpha r)$; $\varphi(\alpha r)$; $\varphi'(\alpha r)$ - funkcja Kelvina-Thomsona i ich pochodne oraz argumenty,
- α - składowa argumentu funkcji Kelvina-Thomsona.

Rozpatrywany ekran z punktu widzenia klasyfikacji jest otwartym nieprzewodzącym ekranem, w którym pole przedostaje się wzdłuż powierzchni jego ściany wewnętrznej na powierzchnię zewnętrznej ściany. Ekran taki narażony są na działanie fali elektromagnetycznej zarówno na ich powierzchni wewnętrznej, jak i powierzchni zewnętrznej, a w literaturze [2] nazywane są ekranami o obustronnym podaniu fali. Strumień energii elektromagnetycznej wnikającej do ekranu i wywołany przez nią skutek cieplny zależne są od wartości prądu w przewodniku oraz właściwości elektrycznych i magnetycznych ekranu. Strumień tej energii rozpatrywany w czasie jednej sekundy jest utożsamiany z mocą i może być określony na drodze analitycznej. Jedną ze stosowanych i sprawdzonych doświadczalnie metod obliczania strat mocy elektromagnetycznej w ekranach otwartych jest metoda [2] określania zespolonego strumienia mocy. Strumień tej mocy określany jest na podstawie wektora Poyntinga. Wektor zespolony Poyntinga, zdefiniowany jako iloczyn wektorowy wartości skutecznej zespolonej natężenia pola elektrycznego i wartości skutecznej sprzężonej natężenia pola magnetycznego, przyjmuje postać:

$$\underline{P}(r-R_1) = H_{\varphi}^2 \sqrt{\omega \mu \rho} \frac{M_{ko}(\alpha r) M'_{ko}(\alpha r)}{\left[M'_{ko}(\alpha R_1)\right]^2} e^{j\left[\varphi(\alpha r) - \varphi'(\alpha r) + \frac{\pi}{2}\right]}, \quad (4)$$

w której: $M_{ko}(\alpha r)$; $M'_{ko}(\alpha r)$; $\varphi(\alpha r)$; $\varphi'(\alpha r)$ - funkcje Kelvina-Thomsona, ich pochodne i argumenty.

Rozpatrywany ekran zanurzony jest w ciekłym azocie, a wytworzona w nim energia cieplna zależna jest również od temperaturowych zmian rezystywności jego metalu. Zależność tę ujmuje w równaniu (4) składowa argumentu funkcji Kelvina-Thomsona

$$\alpha = \left(\frac{\omega \mu}{\rho(T)}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

dla której temperaturowe zmiany rezystywności ekranu określa funkcja Blocha-Grüneisena w postaci [3]:

$$\varphi(T) = \frac{K M^5}{M \Theta^6} \int_0^{\Theta} \frac{x^5 dx}{(e^x - 1)(1 - e^{-x})}, \quad (6)$$

w której:

- M - masa atomowa metalu,
- K - stała charakterystyczna metalu,
- Θ - temperatura Debye'a.

Istotny wpływ na wartość strat mocy w ekranie ma również grubość jego ściany i związane z nią odbicia wewnętrzne fali elektromagnetycznej. Obliczenia analityczne strat mocy wymagają uwzględnienia odbić wewnętrznych fali w ścianie ekranu, gdyż fala padająca na jego powierzchnię przewodnika na przeciwległą jego stronę, nie zdążywszy wygasnąć przed dojściem do ściany przeciwległej. Efekty tego zjawiska określono w oparciu o prawa falowe i przebiegi procesów tłumienia fal elektromagnetycznych w ośrodkach rezystancyjnych [2]. Dla rozpatrywanego przypadku przyjmują one doświadczalnie sprawdzoną [2] postać:

$$\xi = \frac{\operatorname{sh} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \rho}} (R_2 - R_1) - \sin \sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \rho}} (R_2 - R_1)}{\operatorname{ch} \sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \rho}} (R_2 - R_1) + \cos \sqrt{\frac{\omega \mu}{2 \rho}} (R_2 - R_1)} \quad (7)$$

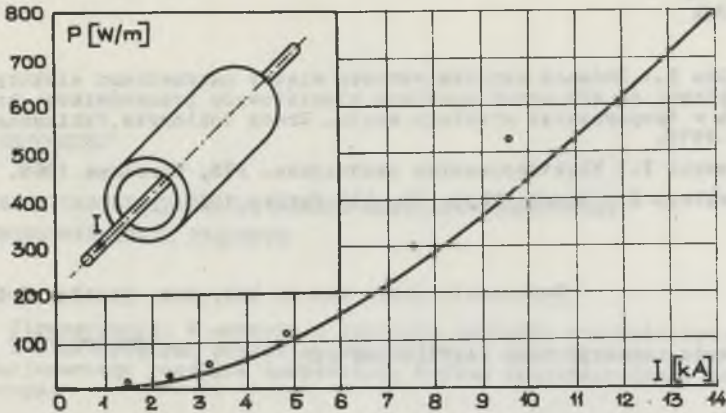
Uwzględniając obustronne padanie fali na ekran oraz współczynnik jego krzywizny $(1 + R_1/R_2)$ określono zespolony strumień mocy wnikaający na drodze elektromagnetycznej do ekranu kanału krioprzewodu:

$$\underline{S} = -2\pi R_1 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) H_\varphi^2 \sqrt{\omega \mu \rho} \frac{M_{ko}(\alpha r) M'_{ko}(\alpha r)}{[M'_{ko}(\alpha R_1)]^2} e^{j[\varphi(\alpha r) - \varphi(\alpha R_1) - \frac{\pi}{2}]} \quad (8)$$

Znak minus na początku równania oznacza, że przepływ energii jest zwrócony od przewodnika do ekranu. Straty mocy czynnej stanowią część rzeczywistą strumienia zespolonego mocy i po uwzględnieniu zależności (7) określone są wzorem:

$$P = 2\pi R_1 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \xi H_\varphi^2 \sqrt{\omega \mu \rho} \frac{M_{ko}(\alpha r) M'_{ko}(\alpha r)}{[M'_{ko}(\alpha R_1)]^2} \cos[\varphi(\alpha r) - \varphi(\alpha R_1)] \quad (9)$$

Wyniki obliczeń jednostkowych strat mocy czynnej w cylindrycznym ekranie miedzianym (Cu 99,5) przedstawiono na rys. 4. Badania doświadczalne dla tego samego ekranu, wykonane w oparciu o bilans energii cieplnej kriotoru, dały wyniki zestawione w tabelicy 1.



Rys. 4. Straty mocy czynnej w miedzianym (Cu 99,5) ekranie elektromagnetycznym krioprzewodu w zależności od prądu; promień ekranu $R_1 = 200$ mm; $R_2 = 202$ mm; o - wyniki doświadczalne

Tablica 1

Straty mocy czynnej w miedzianym (Cu 99,5) ekranie elektromagnetycznym kanału krioprzewodu w zależności od prądu w krioprzewodniku (promień ekranu $R_1 = 200$ mm; $R_2 = 202$ mm)

Ip.	I	\dot{I}	P_{ek}	Ip.	I	\dot{I}	P_{ek}
	A	$\frac{A}{\text{mm}^2}$	$\frac{W}{m}$		A	$\frac{A}{\text{mm}^2}$	$\frac{W}{m}$
1	1450	18,4	14,5	4	4900	62,1	123
2	2300	29,2	36	5	7600	96,9	300
3	3100	39,4	66	6	9600	122,2	530

3. Wnioski

1. Straty energii rozproszenia w kanale krioprzewodu oraz powodowane nimi skutki termiczne w osłonie izolacji cieplnej zmniejszają ekrany elektromagnetyczne.

Skuteczne działanie ekranu zapewnia duży stopień czystości jego metalu i dobra przewodność w niskiej temperaturze.

2. Zachowanie dobrych parametrów elektrycznych ekranu wymaga skutecznego kompensowania naprężeń mechanicznych, powodowanych siłami skurczów termicznych. Naprężenia te powodują deformację struktury metalu i istotny wzrost jego rezystywności [1].

LITERATURA

- [1] Piętka E.: Badania współzależności między parametrami elektrycznymi i cieplnymi na wybranych modelach aluminiowych przewodników kriooporowych w temperaturze ciekłego azotu. Praca doktorska, Politechnika Śląska 1979.
- [2] Turowski I.: Elektrodynamika techniczna. PWN, Warszawa 1968.
- [3] Grüneisen E.: Annale Phys. 16, 530 Berlin 1933.

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Czesław Królikowski

Wpłynęło do redakcji dnia 24.VII.1982 r.

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ЭКРАНЕ
КРИОРЕЗИСТИВНОГО ТОКОПРОВОДА

Р е з ю м е

Показан способ определения потерь активной мощности в электромагнитном экране криорезистивного токопровода. Приведены результаты расчетов и результаты измерений на физической модели.

POWER LOSSES IN ELEKTROMAGNETIC ENCLOSURE
OF THE CRYOCONDUCTORS CHANNEL

S u m m a r y

The paper presents the method of determination of active power losses in the electromagnetic enclosure of the cryoconductors channel. It presents also the experimental results of calculations as well as the results of measurements performed on a model.