

Andrzej BŁASZCZYK

Wiktor KIŚ

Edmund PIĘTKA

PARAMETRY ELEKTRYCZNE KRIOPRZEWODU SKOMPENSOWANEGO DLA ZASILANIA PIECÓW ŁUKOWYCH

Streszczenie. Obliczono rezystancję i reaktancję projektowanego krioprzewodu skompensowanego oraz wyznaczono krytyczne i dopuszczalne wartości prądu.

1. Wprowadzenie

Niektóre odbiory elektrochemiczne i elektrotermiczne, np. piece łukowe, cechuje pobieranie znacznych mocy przy niskim napięciu i dużych prądach. Wiąże się to z koniecznością stosowania specjalnych konstrukcji oszynowania, tzw. torów wielkoprądowych.

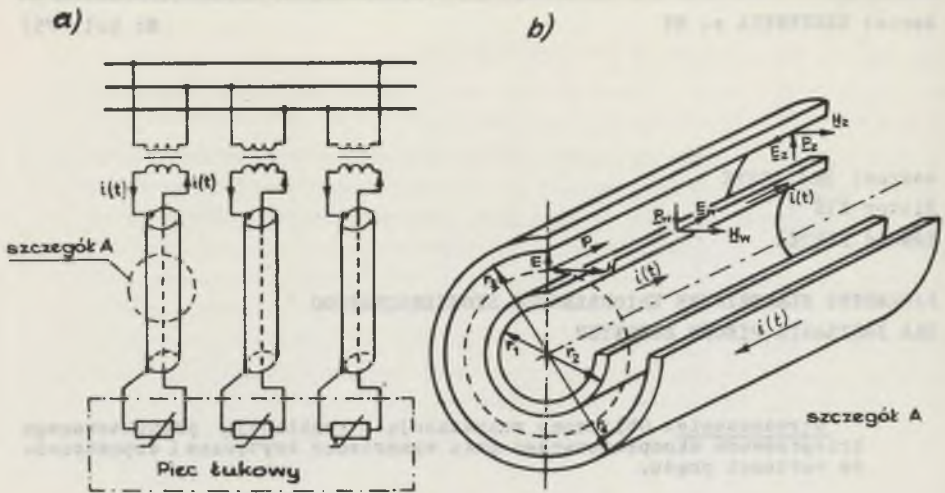
Uzyskiwanie odpowiedniej obciążalności prądowej toru wymaga zastosowania układów szynowych o dużych przekrojach poprzecznych oraz chłodzenia wymuszonego (np. wodnego). Ze względu na wymogi symetryzacji parametrów fazowych obwodu są to zwykle tory wieloszynowe o skomplikowanej konfiguracji (przeplecenia itp.). Znaczna jest również długość toru, wynikająca z warunków technicznych.

Gabaryty i układ przestrzenny toru prądowego, warunkując określony rozkład pola elektromagnetycznego, decydują o wartości rezystancji i reaktancji fazowych obwodu, a więc również o wartości strat mocy między fazami obwodu oraz stratach mocy wskutek rozproszenia.

Radykalnym środkiem zmierzającym do ograniczenia tych niekorzystnych efektów może być zastosowanie toru wielkoprądowego skompensowanego, chłodzonego ciekłym azotem, tzw. kriotoru skompensowanego (rys. 1).

Zalety toru skompensowanego wynikają z ograniczenia przestrzeni występowania pola elektromagnetycznego do objętości zawartej między współosiowymi powierzchniami walcowymi przewodów fazowych. Daje to praktycznie możliwość wyeliminowania zjawiska międzyfazowej transformacji mocy oraz strat energii rozproszenia wokół toru prądowego i związanego z nimi nagrzewania się pobliskich konstrukcji stalowych.

Zalety te jednak równoważone są pewnymi trudnościami w utrzymywaniu niskiej temperatury przewodów. Ich osłony termiczne, zazwyczaj próżniowe, muszą zapewniać zarówno dobrą szczelność, jak i kompensację sił skurczów



Rys. 1. Schemat ideowy toru skompensowanego zasilającego piec łukowy a) układ toru, b) fragment przewodu fazowego

termicznych, powstających w metalach konstrukcyjnych w wyniku dużych gradientów temperatury. Zastosowanie ciekłego azotu w kriotorach skompensowanych wydaje się być jednak korzystne z uwagi na jego dobre właściwości elektroizolacyjne, niezbędne wobec bliskości cylindrów o zróżnicowanych potencjałach. Niska temperatura ciekłego azotu pozwala na zmniejszenie rezystancji przewodów i w rezultacie strat mocy Joule'a.

2. Rezystancja kriotoru skompensowanego

Rezystywność metalu można przedstawić w postaci sumy:

$$\rho(T) = \rho_0 + \rho_1(T) \quad (1)$$

rezystywności szczątkowej ρ_0 , praktycznie niezależnej od temperatury i rezystywności idealnej $\rho_1(T)$ w temperaturze T . Rezystywność szczątkowa jest następstwem defektów sieci krystalicznej oraz wtrąceń domieszkowych obcych pierwiastków, natomiast rezystywność idealna jest efektem drgań termicznych sieci krystalicznej, zakłócających uporządkowany ruch elektronów. Udział rezystywności szczątkowej w rezystywności całkowitej rośnie ze zmniejszaniem się temperatury. W efekcie występuje coraz silniejsza zależność rezystywności całkowitej od stopnia zanieczyszczenia metalu (tabl. 1).

Rezystancję kriotoru skompensowanego można obliczyć w oparciu o analizę pola elektromagnetycznego w przekroju cylindrów (rys. 1b) oraz wektor Poyntinga

$$\underline{P} = \frac{1}{2} \underline{E} \underline{H}^* \quad (2)$$

(gwiazdką oznaczono wektor sprzężony). Strumień wektora Poyntinga, wnika-
jący do przewodnika poprzez jego powierzchnię (s), nazywany jest mocą ze-
spoloną

$$\underline{S} = \oint \underline{P} ds = I^2(R + jX), \quad (3)$$

gdzie:

- R, X - rezystancja i reaktancja przewodnika,
I - wartość skuteczna prądu.

Tablica 1

Rezystywność całkowita w temperaturze 77,35 K i 293 K
oraz rezystywność szcztatkowa dla aluminium
o różnych stopniach czystości [1]

Stopień czystości Al	ρ_0		$\rho(T)$	
	T = 4,2 K		T = 77,35 K	T = 293 K
	x 10 ⁻⁸ $\Omega \cdot m$		x 10 ⁻⁸ $\Omega \cdot m$	x 10 ⁻⁸ $\Omega \cdot m$
Al 99,9999	0,0008		0,2105	2,60
Al 99,9995	0,0010		0,2215	2,64
Al 99,999	0,0013		0,2261	2,65
Al 99,99	0,0021		0,2364	2,66
Al 99,9	0,0291		0,2702	2,71

Na podstawie zależności (3) dla układu wg rys. 1b wyprowadzono wzory
na rezystancje jednostkowe cylindra wewnętrznego R_w i zewnętrznego R_z
[1]:

$$R_w = \frac{1}{I^2} \operatorname{Re} \left\{ \underline{S}_w \right\} = \frac{\sqrt{\mu\omega\rho}}{2\pi r_2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{M'_{ko}(\alpha r_1) M_{Jo}(\alpha r_2) + M'_{Jo}(\alpha r_1) M_{ko}(\alpha r_2)}{G(\alpha, r_1, r_2)} \right\} \quad (4)$$

$$R_z = \frac{1}{I^2} \operatorname{Re} \left\{ \underline{S}_z \right\} = \frac{\sqrt{\mu\omega\rho}}{2 r_3} \operatorname{Re} \left\{ \frac{M'_{ko}(\alpha r_4) M_{Jo}(\alpha r_3) + M'_{Jo}(\alpha r_4) M_{ko}(\alpha r_3)}{G(\alpha, r_3, r_4)} \right\} \quad (5)$$

gdzie:

- $\underline{S}_w, \underline{S}_z$ - strumienie zespolone wektorów Poyntinga,
 ω - pulsacja,
 μ - przenikalność magnetyczna,
 ρ - rezystywność
 α - parametr ($\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\rho}}$),
 r_1, r_2, r_3, r_4 - promienie cylindrów,

funkcje Kelvina-Thomsona oraz ich pochodne:

$$\underline{G}(\alpha, r_1, r_2) = \underline{M}'_{J_0}(\alpha r_2) \underline{M}'_{k_0}(\alpha r_1) - \underline{M}'_{J_0}(\alpha r_1) \underline{M}'_{k_0}(\alpha r_2)$$

$$\underline{G}(\alpha, r_4, r_3) = \underline{M}'_{J_0}(\alpha r_3) \underline{M}'_{k_0}(\alpha r_4) - \underline{M}'_{J_0}(\alpha r_4) \underline{M}'_{k_0}(\alpha r_3)$$

$$\underline{M}_{J_0}(\alpha r) = \text{ber}(\alpha r) + j \text{bei}(\alpha r)$$

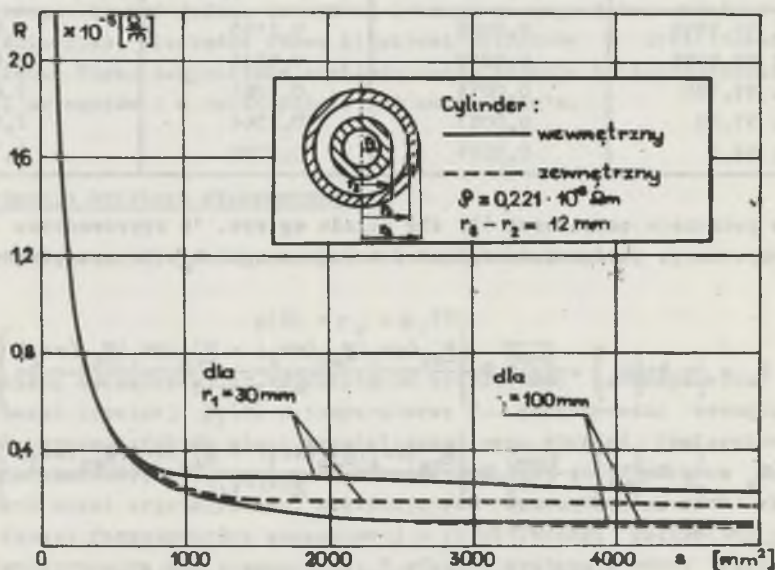
$$\underline{M}_{k_0}(\alpha r) = \text{kei}(\alpha r) + j \text{ker}(\alpha r)$$

$$\underline{M}'_{J_0}(\alpha r) = \text{bei}'(\alpha r) + j \text{ber}'(\alpha r)$$

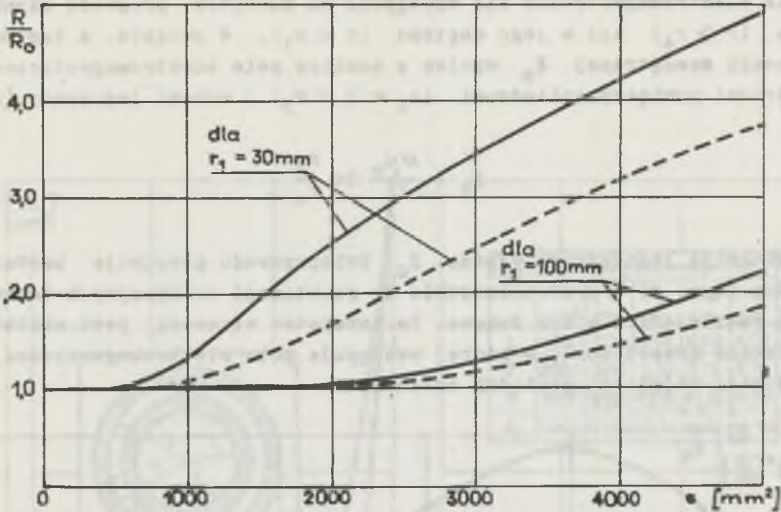
$$\underline{M}'_{k_0}(\alpha r) = \text{ker}'(\alpha r) + j \text{kei}'(\alpha r)$$

Wartości funkcji ber, bei, ker, kei oraz wartości ich pochodnych można znaleźć np. w podręczniku [4].

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono wyniki obliczeń rezystancji jednostkowych R_w i R_z oraz współczynniki efektu naskórkowego prądu przemiennego 50 Hz w cylindrach krietera skompensowanego.



Rys. 2. Rezystancja jednostkowa przewodu skompensowanego w zależności od powierzchni przekroju cylindra



Rys. 3. Współczynnik naskórkowości dla przewodu skompensowanego w zależności od powierzchni przekroju cylindra (dane i oszacowania wg rys. 2)

3. Reaktancja krioprzewodu

Całkowitą reaktancję własną krioprzewodu skompensowanego, przypadającą na jednostkę długości, można wyrazić jako sumę:

$$X_C = X_{ww} + X_{ws} + X_z, \quad (6)$$

gdzie:

X_{ww} - reaktancja jednostkowa wewnętrzna cylindra wewnętrznego,

X_{ws} - jw., lecz cylindra zewnętrznego,

X_z - reaktancja jednostkowa zewnętrzna.

Uwzględniając zjawisko naskórkowości wartości reaktancji X_{ww} i X_{ws} określa się na podstawie zależności (3):

$$X_{ww} = \frac{1}{I^2} \operatorname{Im} \left\{ \frac{S_w}{Z} \right\} = \frac{\sqrt{\mu \omega \rho}}{2\pi r_2} \operatorname{Im} \left\{ \frac{\frac{M'_{ko}(\alpha r_1) M_{Jo}(\alpha r_2) + M'_{Jo}(\alpha r_1) M_{ko}(\alpha r_2)}{\underline{U}(\alpha, r_1, r_2)}} \right\} \quad (7)$$

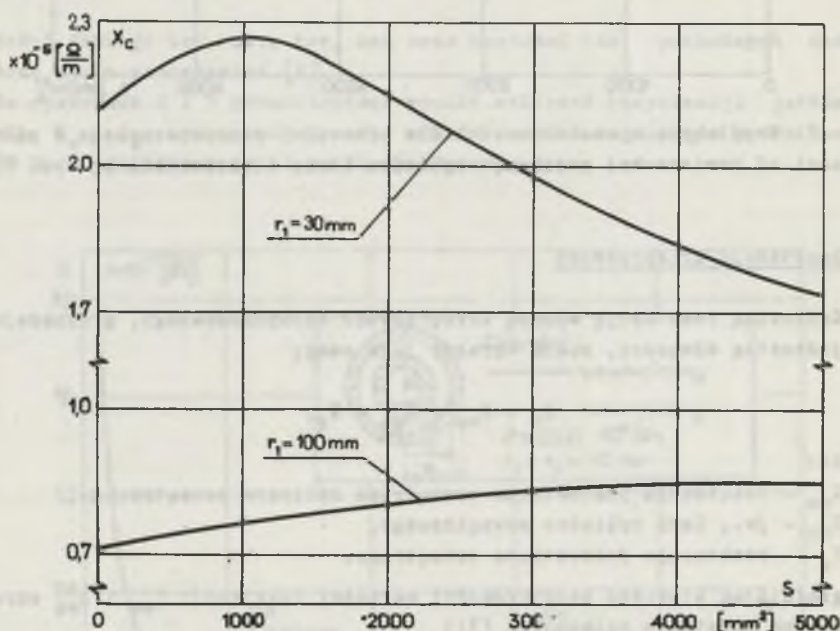
$$X_{ws} = \frac{1}{I^2} \operatorname{Im} \left\{ \frac{S_s}{Z} \right\} = \frac{\sqrt{\mu \omega \rho}}{2\pi r_3} \operatorname{Im} \left\{ \frac{\frac{M'_{ko}(\alpha r_4) M_{Jo}(\alpha r_3) + M'_{Jo}(\alpha r_4) M_{ko}(\alpha r_3)}{\underline{U}(\alpha, r_4, r_3)}} \right\} \quad (8)$$

Wielkości występujące we wzorach (7) i (8) określono przy wzorach (4) i (5).

Pole elektromagnetyczne nie występuje na zewnątrz przewodu skompensowanego ($r > r_4$) ani w jego wnętrzu ($r < r_1$). W związku z tym wartość reaktancji zewnętrznej X_z wynika z analizy pola elektromagnetycznego w przestrzeni pomiędzy cylindrami ($r_2 < r < r_3$) i wynosi (wg pracy [2]):

$$X_z = \frac{\omega \mu_0}{2} \ln \frac{r_3}{r_4} \quad (9)$$

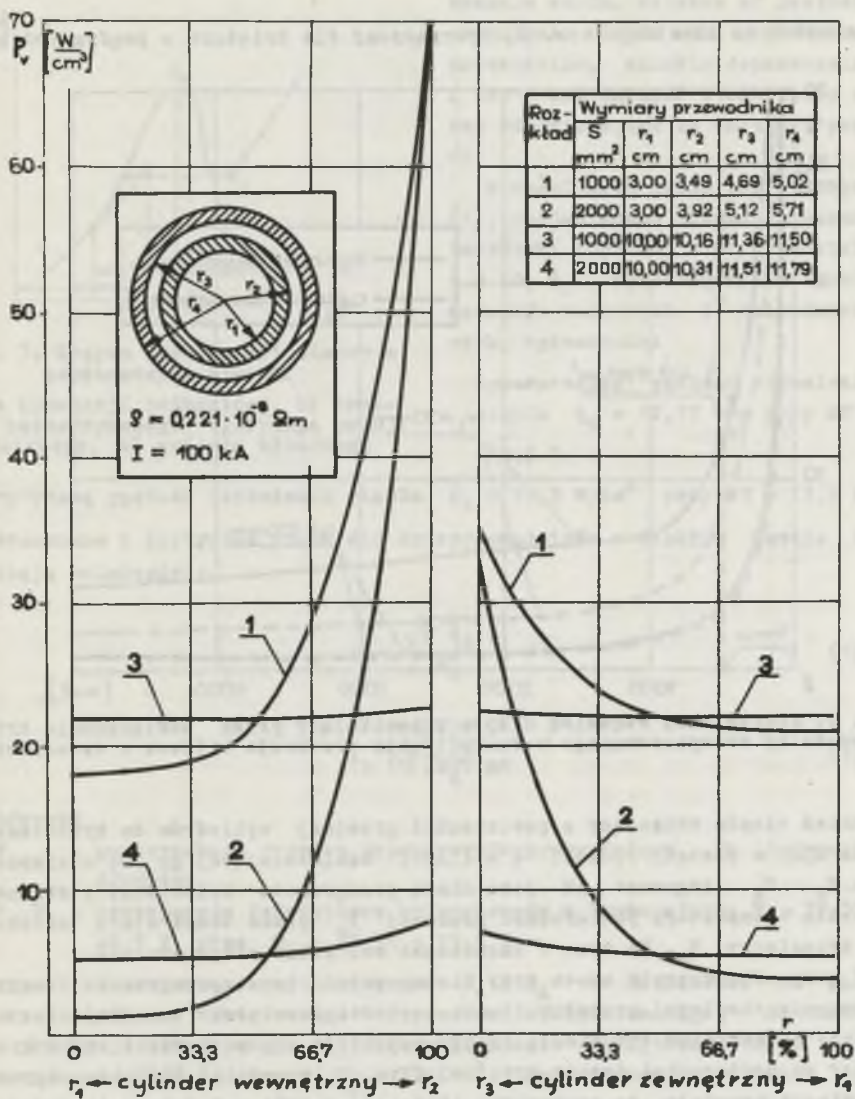
Reaktancja jednostkowa własna X_c krioprzewodu przyjmuje bardzo małe wartości (rys. 4) w przeciwieństwie do reaktancji tradycyjnych torów prądowych zasilających piece łukowe. Ta korzystna własność jest skutkiem ograniczenia przestrzeni, w której występuje pole elektromagnetyczne, do niewielkiej objętości pomiędzy cylindrami.



Rys. 4. Reaktancja jednostkowa własna krioprzewodu skompensowanego (dane i oznaczenia wg rys. 2)

4. Dopuszczalne i krytyczne prądy w kriotorze

W cienkościennych cylindrach aluminiowych (143 mm) krioprzewodu rozkład gęstości mocy Joule'a jest w przybliżeniu stały (krzywe 3 i 4, rys. 5). Przyjmując jednakowe warunki wymiany ciepła wszystkich powierzchni grzejnych cylindrów można określić gęstość powierzchniową strumienia energii dla cylindra wewnętrznego i zewnętrznego

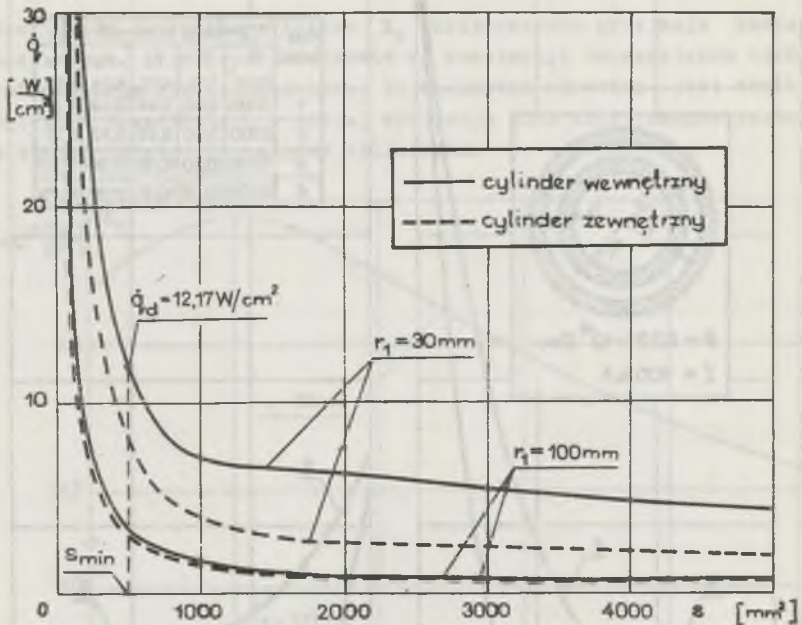


Rys. 5. Rozkład gęstości mocy Joule'a w przekroju krioprzewodnika skompensowanego

$$\dot{q}_w = \frac{I^2 R_w}{2\pi(r_1 + r_2)}, \quad (10)$$

$$\dot{q}_z = \frac{I^2 R_z}{2\pi(r_3 + r_4)}. \quad (11)$$

Zależności te ilustruje rys. 6, spersadsony dla kriotoru s prądem 100 kA.

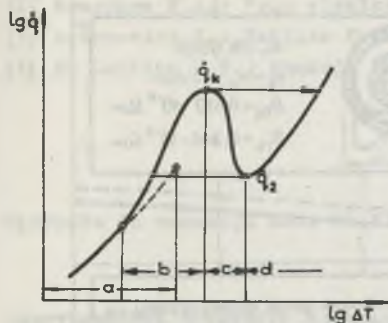


Rys. 6. Jednostkowy strumień ciepła przenikający przez powierzchnię krioprowodnika skompensowanego w funkcji pola przekroju s (dane i oznaczenia wg rys. 2)

Strumień ciepła wnikający z powierzchni grzejnej cylindrów do kriociecicy można ująć w postaci funkcji $\dot{q} = \dot{q}(\Delta T)$, usależniającej go od wielkości $\Delta T = T_p - T_g$. Argument ΔT jest miarą przegrzania kriociecicy i stanowi nadwyżkę temperatury powierzchni grzejnej T_p ponad temperaturę nasycenia kriociecicy T_g . Na rys. 7 zaznaczono wszystkie etapy wrzenia.

W przypadku wrzenia azotu przy niesnacznym jego przegrzaniu (małym strumieniu ciepłym) przepływ ciepła zachodzi na skutek konwekcji naturalnej. Ze wzrostem strumienia ciepła pojawiają się pęcherzyki pary kriociecicy na powierzchni ściany grzejnej (rys. 7, przedział b). Dalszy wzrost strumienia powoduje, że pęcherzyki stają się tak liczne, że łączą się ze sobą zanim oderwą się od powierzchni grzejnej. Powstająca w ten sposób błona parowa znacznie pogarsza intensywność odprowadzania ciepła. Gwałtowne przejście z etapu wrzenia pęcherzykowego przy \dot{q}_k do wrzenia błonowego

swane jest pierwszym kryzysem wrzenia. Przejście odwrotne odbywa się tak-
te nagle w wyniku rozpadu błony na oddzielne pęcherse i nazywane jest
drugim kryzysem wrzenia.



Rys. 7. Krzywa wrzenia kriocieczny z zaznaczonymi etapami

a) w konwekcji naturalnej, b) wrzenia pęchersykowego, c) wrzenia przejściowego, d) wrzenia błonowego

- krytyczną gęstość strumienia ciepła $\dot{q}_k = 15,3 \text{ W/cm}^2$ przy $\Delta T = 13,5 \text{ K}$.
Dopuszczalne i krytyczne prądy dla krioprzewodników w ciekłym azocie określa się zależnościami:

$$I_d = \sqrt{\frac{F \dot{q}_d}{R_d}}, \quad (12)$$

$$I_k = \sqrt{\frac{F \dot{q}_k}{R_k}} \quad (13)$$

w których:

F - powierzchnia grzejna krioprzewodu przypadająca na jednostkę długości,

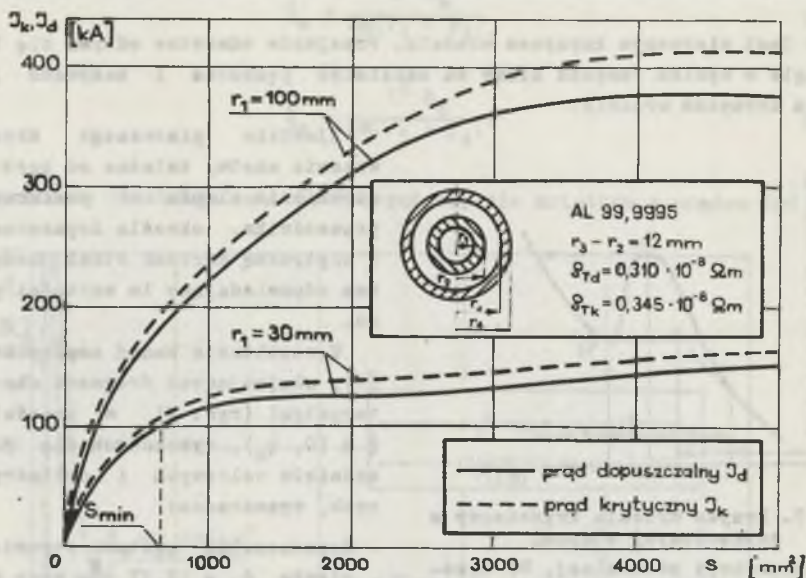
R_d, R_k - rezystancje jednostkowe krioprzewodu w temperaturze $T_d = 77,35 + 9,5 \text{ K}$ oraz $T_k = 77,35 + 13,5 \text{ K}$.

Na rys. 8 przedstawiono wartości prądów I_d i I_k w zależności od pola przekroju cylindra wewnętrznego krioprzewodu skompensowanego. Minimalne pole przekroju aluminiowego cylindra o promieniu wewnętrznym $r_1 = 30 \text{ mm}$ dla prądu $I = 100 \text{ kA}$ wynosi ok. 700 mm^2 . Jest to wartość większa niż wynikałoby z rys. 6 (ok. 500 mm^2) - różnica spowodowana jest uwzględnieniem większych rezystywności materiału przewodowego w temperaturze $77,35 + \Delta T$.

Zjawisko pierwszego kryzysu wrzenia azotu, zależne od gęstości strumienia ciepła na powierzchni przewodnika, określa dopuszczalną i krytyczną wartość strat mocy oraz odpowiadające im wartości prądu.

W rezultacie badań empirycznych [1], obejmujących fragment charakterystyki (rys. 7) w przedziale $\dot{q} \in (0, \dot{q}_k)$, wykonanych dla przewodników walcowych i cylindrycznych, wyznaczono:

- dopuszczalną gęstość strumienia ciepła $\dot{q}_d = 12,17 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ przy $\Delta T = 9,5 \text{ K}$,



Rys. 8. Krytyczne i dopuszczalne wartości prądów w krioprzewodnikach skompensowanych w zależności od ich przekroju

5. Wnioski

1. Kriotory skompensowane pozwalają na zmniejszenie całkowitych strat mocy w torze prądowym poprzez wyeliminowanie strat energii rozproszenia.
2. Cylindryczne przewodniki aluminiowe w ciekłym azocie wykazują znaczne zmniejszenie (ok. 12,5 razy) rezystywności w stosunku do rezystywności w temperaturze 20°C. Dobierając materiał, z którego mają być wykonane krioprzewodniki, należy preferować metale o jak największym stopniu czystości, gdyż mają one w niskiej temperaturze zdecydowanie mniejszą rezystywność od metali zawierających dużą ilość obcych domieszek.
3. Mała rezystywność aluminium w niskiej temperaturze jest przyczyną znacznie większych efektów naskórkowości w stosunku do występujących w temperaturze otoczenia. W związku z tym należy dobrać przewodniki skompensowane składające się z cylindrów o cienkich ściankach i dużych średnicach, gdyż pozwala to na znacznie lepsze wykorzystanie ich przekrojów.
4. Kriotory skompensowane mają małą reaktancję na jednostkę długości, dzięki czemu pobierają znikomą ilość mocy biernej w porównaniu z torami tradycyjnymi. Ich zastosowanie stwarza możliwość znacznego poprawienia współczynnika mocy odbiorów zasilanych.

LITERATURA

- [1] Piętka E.: Badania współzależności między parametrami elektrycznymi i cieplnymi na wybranych modelach aluminiowych przewodników kriopogowych w temperaturze ciekłego azotu. Praca doktorska, Politechnika Śląska, 1979.
- [2] Goworkow W.A.: Pole elektryczne i magnetyczne. WNT, Warszawa 1962.
- [3] Antonowicz J.: Tablice funkcji dla inżynierów. WNT, Warszawa 1969.
- [4] Mc Lachlan N.W.: Funkcje Bessela dla inżynierów. PWN, Warszawa 1964.

Recenzent: prof. dr inż. Maciej Krakowski

Wpłynęło do redakcji dnia 24.VII.1982 r.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПЕНСИРОВАННОГО КРИОРЕЗИСТИВНОГО
ТОКОПРОВОДА ДЛЯ ПИТАНИЯ ДУГОВЫХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ

Р е з ю м е

Сделаны расчёты значений активного и реактивного сопротивления криорезистивного токопровода. Определены критические и допустимые значения токовой нагрузки.

THE ELECTRICAL PARAMETERS OF A COMPENSATED
CRYOCONDUCTOR USED TO SUPPLY ARC FURNACES

S u m m a r y

The value of resistance and reactance are determined for a compensated cryoconductor. Moreover, the critical and maximum current values are defined.