

Roman KROK

## OPTIMALIZACJA KRIOPRZEPUSTÓW W NADPRZEWODNIKOWYCH GENERATORACH SYNCHRONICZNYCH

Streszczenie. W artykule zestawiono metody optymalizacji torów prądowych różnych typów krioprzepustów stosowanych w generatorach nadprzewodnikowych. Specjalną uwagę poświęcono budowie oraz rozwiązaniu modelu matematycznego, opisującego stan cieplnie ustalony w krioprzepustach chłodzonych równoległe o torze prądowym wykonanym w postaci linki.

## OPTIMIZATION OF CRYOGENIC LEADS IN SUPERCONDUCTING SYNCHRONIC GENERATORS

Summary. In the paper optimization methods of current paths of various types of cryogenic leads applied in superconducting generators are summarized. A particular attention is paid to construction and solution of the mathematical model describing a thermally steady state in cryogenic leads being cooled in parallel with a current path in the form of a strand.

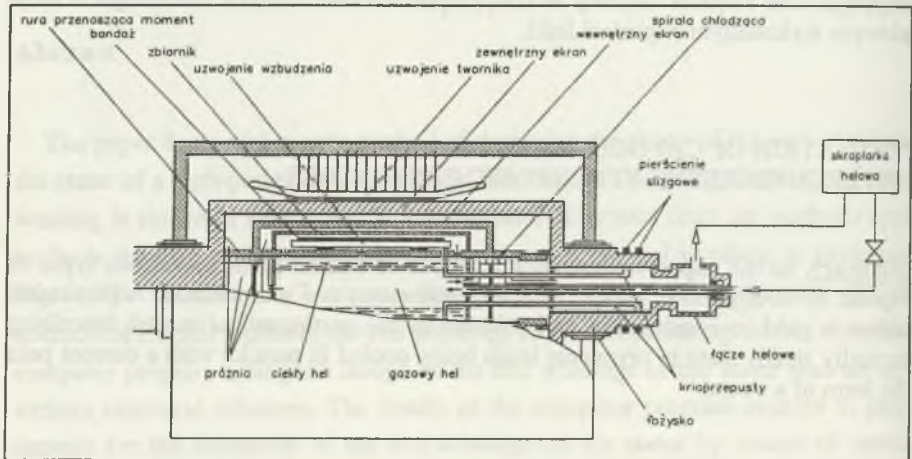
## ОПТИМИЗАЦИЯ ТОКОВОДОВ В СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

Резюме. В статье составлены методы оптимизации токоведущих узлов разных типов тоководов применяемых в сверхпроводниковых генераторах. Особое внимание посвящено построению и решению математической модели описывающей установленное тепловое состояние в параллельно охлаждаемых тоководах с токоведущим узлом в форме троска.

## 1. WIADOMOŚCI WSTĘPNE

Optimalizacja krioprzepustów stanowi jedno z istotniejszych zagadnień cieplnych, z jakimi spotykamy się w generatorach synchronicznych z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia. Tor prądowy krioprzepustu, wykonany najczęściej w postaci pręta miedzianego, łączy pierścienie ślizgowe pracujące w temperaturze  $30^{\circ}\text{C}$  z uzwojeniem wzbudzenia zanurzonym w ciekłym helu o temperaturze  $-268^{\circ}\text{C}$ . Duża różnica temperatur panująca na końcach toru prądowego powoduje przepływ znacznego strumienia ciepłego poprzez tor prądowy do przestrzeni niskotemperaturowej.

Na rys. 1 przedstawiono schematyczny przekrój podłużny generatora o mocy 50 MV·A [1] z widocznymi krioprzepustami.



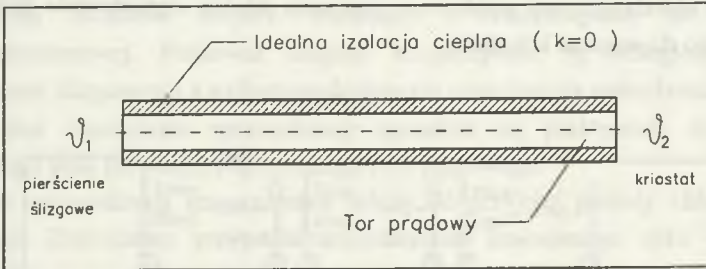
Rys.1. Schematyczny przekrój podłużny generatora synchronicznego z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia o mocy 50 MVA

Fig.1. Diagrammatic longitudinal section of a synchronic generator with superconduction excitation winding of 50 MVA power

Strumień ciepły przepływający poprzez tor prądowy do przestrzeni niskotemperaturowej można ograniczyć stosując chłodzenie toru prądowego parami helu wydostającymi się z kriostatu oraz dobierając właściwe wymiary toru prądowego w taki sposób, aby ograniczyć do minimum ilość ciepła dostającego się do przestrzeni niskotemperaturowej.

W pierwszych modelowych generatorach synchronicznych z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia o stosunkowo małych mocach znamionowych stosowano krioprzepusty izolowane.

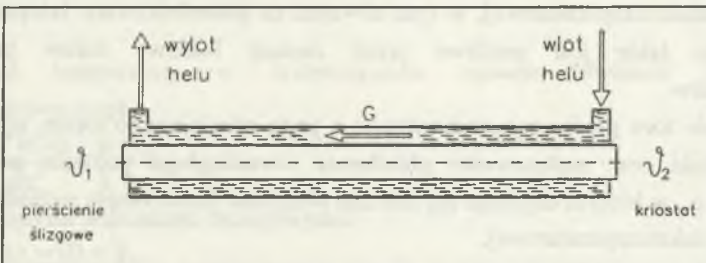
Krioprzepust taki przedstawiony jest na rys. 2, gdzie współczynnik oddawania ciepła  $k$  w przypadku idealnej izolacji cieplnej jest równy zero. Brak chłodzenia toru prądowego powoduje przedostawanie się znacznych ilości ciepła do przestrzeni niskotemperaturowej, tj. do kriostatatu.



Rys.2. Przekrój podłużny krioprzepustu izolowanego cieplnie

Fig.2. Longitudinal section of cryogenic lead with thermal insulation

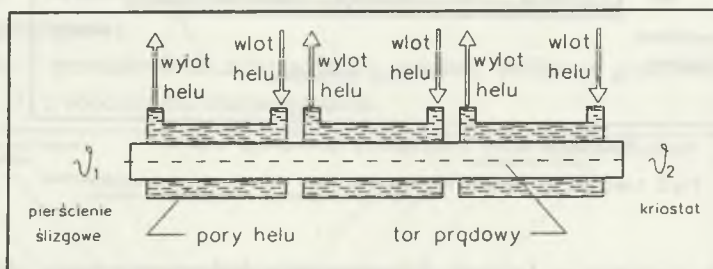
Znacznym postępem w budowie krioprzepustów było zastosowanie chłodzenia szeregowego toru prądowego. Krioprzepust z tym systemem chłodzenia przedstawiony jest na rys. 3, gdzie symbolem  $G$  oznaczono wydatek czynnika chłodzącego krioprzepust, tj. par helu. Silne nagrzewanie się czynnika chłodzącego wzdłuż całej długości toru prądowego powoduje stosunkowo małe ograniczenie ilości ciepła przedostającego się do przestrzeni niskotemperaturowej w porównaniu do krioprzepustu izolowanego.



Rys.3. Przekrój podłużny krioprzepustu chłodzonego szeregowo

Fig.3. Longitudinal section of cryogenic lead with cooling in series

Zastosowanie chłodzenia równoległego w miejsce chłodzenia szeregowego pozwoliło znacznie zwiększyć skuteczność chłodzenia toru prądowego. Rozwiązanie takie przedstawione jest na rys. 4. Wykonanie dużej liczby równoległe zasilanych czynnikiem chłodzącym wymienników ciepła umożliwia utrzymanie praktycznie stałej temperatury czynnika chłodzącego wzdłuż całej długości toru prądowego. Duża skuteczność chłodzenia toru prądowego zapewnia istotne ograniczenie ilości ciepła wpływającego do wnętrza kriostatu.



Rys.4. Przekrój podłużny krioprzepustu chłodzonego równoległe

Fig 4. Longitudinal section of cryogenic lead with cooling in parallel

W budowanych w ostatnich latach generatorach synchronicznych z nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia o dużej mocy znamionowej, rzędu kilkudziesięciu MV-A, zaistniała potrzeba dalszego ograniczenia ilości ciepła przedostającego się do przestrzeni niskotemperaturowej, w tym również za pośrednictwem krioprzepustów. Ograniczenie takie jest możliwe przez zmianę budowy torów prądowych krioprzepustów.

Zastąpienie toru prądowego wykonanego z pręta miedzianego torem wykonanym w postaci linki oraz zastosowanie chłodzenia równoległego pozwala na budowę krioprzepustu, w którym uzyskuje się znaczne obniżenie ilości ciepła wchodzącego do przestrzeni niskotemperaturowej.

W artykule przedstawiono model matematyczny opisujący stan cieplnie ustalony w tak zbudowanym krioprzepuscie, jego rozwiązanie oraz sposób optymalizacji toru prądowego wykonanego w postaci linki miedzianej.

## 2. OPTIMALIZACJA KRIOPRZEPUSTÓW Z TORAMI PRĄDOWYMI WYKONANYMI W POSTACI PRĘTA MIEDZIANEGO

Zagadnienie optymalizacji sprowadza się do określenia długości oraz pola przekroju poprzecznego toru prądowego w taki sposób, aby zapewniony był możliwie najmniejszy strumień cieplny wnikaający z krioprzepustu do przestrzeni niskotemperaturowej. Ponieważ długość krioprzepustu, tj. odległość pomiędzy pierścieniami ślizgowymi a nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia, jest z góry zadana, stąd zagadnienie optymalizacji ogranicza się praktycznie do określenia optymalnego pola przekroju poprzecznego toru prądowego.

Sposób optymalizacji krioprzepustu zależy od przyjętej metody chłodzenia toru prądowego. Rozważono przypadki krioprzepustu izolowanego oraz chłodzonego równolegle.

### 2.1. Optymalizacja krioprzepustów izolowanych

Przy formułowaniu modelu matematycznego stanu cieplnie ustalonego przyjęto następujące założenia:

- tor prądowy krioprzepustu wykonany jest z okrągłego przewodu miedzianego,
- przewodność cieplna właściwa pręta nie zależy od temperatury,
- rezystywność materiału toru prądowego nie zależy od temperatury,
- krioprzepust posiada idealną izolację cieplną.

Rozkład temperatury w krioprzepuscie opisuje równanie różniczkowe przewodnictwa ciepła:

$$\frac{d^2\vartheta(x)}{dx^2} + \frac{p}{\lambda} = 0 \tag{1}$$

z następującymi warunkami brzegowymi:

$$\vartheta(x=0) = \vartheta_1,$$

$$\vartheta(x=1) = \vartheta_2,$$

którego rozwiązaniem jest wyrażenie:

$$\vartheta(x) = -\frac{p}{2\lambda}x^2 + \left(\frac{\vartheta_2 - \vartheta_1 + \frac{p}{2\lambda}}{1}\right)x + \vartheta_1, \tag{2}$$

gdzie:

- $\vartheta(x)$  - rozkład temperatury w krioprzepuscie,
- $l$  - długość krioprzepustu,
- $\lambda$  - przewodność cieplna właściwa materiału toru prądowego,
- $p$  - jednostkowe straty mocy w torze prądowym.

Moc cieplna wchodząca do kriostatu jest opisana wzorem:

$$P_2 = -\lambda S \left. \frac{d\vartheta(x)}{dx} \right|_{(x=l)} \quad (3)$$

Optymalne pole przekroju poprzecznego krioprzepustu  $s_{opt}$  odpowiada minimalnej wartości mocy cieplnej wchodzącej do kriostatu, czyli

$$\frac{dP_2(s_{opt})}{ds} = 0 \quad (4)$$

Rozwiązanie [2] przedstawionego modelu matematycznego pozwala na wyznaczenie relacji na optymalne pole przekroju poprzecznego krioprzepustu. Ma ona postać:

$$\frac{s_{opt}}{l} = I \sqrt{\frac{\rho_0}{2\lambda(\vartheta_1 - \vartheta_2)}} \quad (5)$$

gdzie:

- $s_{opt}$  - optymalne pole przekroju poprzecznego krioprzepustu,
- $I$  - natężenie prądu w krioprzepuscie,
- $\rho_0$  - rezystywność materiału toru prądowego,
- $\vartheta_1, \vartheta_2$  - temperatury na końcach krioprzepustu.

Obliczenia wykonane dla krioprzepustu miedzianego o długości 100 cm, pracującego przy temperaturach na brzegach odpowiednio  $\vartheta_1 = 30^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta_2 = -268^\circ\text{C}$  przy prądzie  $I = 1000$  A, wykazały, że optymalne pole przekroju poprzecznego wynosi  $s_{opt} = 2,73$  cm<sup>2</sup>, zaś minimalna moc cieplna wchodząca do kriostatu wynosi  $P_2 = 58,5$  W.

Uwzględnienie zmiany rezystywności materiału krioprzepustu pracującego w bardzo szerokim zakresie temperatur od  $-268^\circ\text{C}$  do  $30^\circ\text{C}$  pozwala na uściślenie modelu. Przyjmując liniową zmianę rezystywności miedzi z temperaturą  $\rho = \rho_0(1 + \alpha\vartheta(x))$  można rozkład temperatury wzdłuż długości krioprzepustu opisać równaniem różniczkowym przewodnictwa ciepła w postaci:

$$\frac{d^2\vartheta(x)}{dx^2} - a^2\vartheta(x) + b = 0, \quad (6)$$

gdzie:  $a^2 = -\frac{\alpha p_0}{\lambda}$ ,  $b = \frac{p_0}{\lambda}$ ,  $\frac{b}{a^2} = -\frac{1}{\alpha}$ .

Dla przyjętych warunków brzegowych:

$$\vartheta(x=0) = \vartheta_1,$$

$$\vartheta(x=1) = \vartheta_2$$

rozwiązaniem równania (6) jest wyrażenie:

$$\vartheta(x) = \frac{\left(\vartheta_2 + \frac{1}{\alpha}\right) - \left(\vartheta_1 + \frac{1}{\alpha}\right) \cos(\varepsilon l)}{\sin(\varepsilon l)} \sin(\varepsilon x) + \left(\vartheta_1 + \frac{1}{\alpha}\right) \cos(\varepsilon x) - \frac{1}{\alpha}, \quad (7)$$

gdzie:  $\varepsilon = \sqrt{\frac{\alpha \rho_0}{\lambda}},$

$\rho_0$  - straty jednostkowe w krioprzepuscie w temperaturze 0°C .

Relację na moc cieplną wchodzącą do kriostatu  $P_2$  oraz przekrój optymalny  $S_{opt}$  otrzymuje się wykorzystując zależności (3) i (4).

Ostatecznie wyrażenie na przekrój optymalny przyjmuje postać:

$$\frac{S_{opt}}{l} = \frac{I \sqrt{\frac{\alpha \rho_0}{\lambda}}}{\arccos \frac{\vartheta_2 + \frac{1}{\alpha}}{\vartheta_1 + \frac{1}{\alpha}}}, \quad (8)$$

gdzie:  $\rho_0$  - rezystywność materiału toru prądowego w temperaturze 0°C,  
 $\alpha$  - cieplny współczynnik rezystancyjny miedzi.

Optymalne pole przekroju poprzecznego krioprzepustu o danych określonych poprzednio wynosi 2,58 cm<sup>2</sup> i jest mniejsze o 5,5% od przypadku, gdy rezystywność miedzi przyjęto jako stałą niezależną od temperatury.

## 2.2. Optymalizacja krioprzepustów chłodzonych równolegle

Przy formułowaniu modelu matematycznego stanu cieplnie ustalonego przyjęto następujące założenia:

- a) tor prądowy krioprzepustu wykonany jest z okrągłego przewodu miedzianego,
- b) przewodność cieplna właściwa materiału pręta nie zależy od temperatury,
- c) rezystywność materiału toru prądowego jest liniową funkcją temperatury  $\rho = \rho_0(1 + \alpha\vartheta(x)),$

- d) temperatura czynnika chłodzącego na całej długości krioprzepustu jest stała (warunek ten jest spełniony przy podziale krioprzepustu na stosunkowo dużą liczbę krótkich odcinków zasilanych w sposób równoległy czynnikiem chłodzącym),  
 e) współczynnik oddawania ciepła na bocznej powierzchni styku tor prądowy-czynnik chłodzący ma wartość stałą.

Rozkład temperatury w krioprzepusie opisuje równanie różniczkowe przewodnictwa ciepła:

$$\frac{d^2 \vartheta(x)}{dx^2} - a^2 \vartheta(x) + b = 0, \quad (9)$$

gdzie:

$$a^2 = \frac{ku - \alpha p_0 s}{\lambda s}, \quad b = \frac{p_0 s + ku \vartheta_k}{\lambda s}, \quad \frac{b}{a^2} = \frac{p_0 s + ku \vartheta_k}{ku - \alpha p_0 s}.$$

Dla przyjętych warunków brzegowych:

$$\vartheta(x=0) = \vartheta_1,$$

$$\vartheta(x=1) = \vartheta_2$$

rozwiązaniem równania (9) jest wyrażenie:

$$\vartheta(x) = \frac{\left(\vartheta_2 - \frac{b}{a^2}\right) \sinh(ax)}{\sin h(al)} + \frac{\left(\vartheta_1 - \frac{b}{a^2}\right) \sinh[a(1-x)]}{\sin h(al)} + \frac{b}{a^2}, \quad (10)$$

w którym występują nie pojawiające się wcześniej oznaczenia:

$k$  - współczynnik oddawania ciepła z toru prądowego do czynnika chłodzącego,

$u$  - obwód toru prądowego,

$\vartheta_k$  - temperatura czynnika chłodzącego.

Moc wchodząca do kriostatu oraz optymalne pole przekroju poprzecznego krioprzepustu wyznaczono na podstawie zależności (3) i (4). Obliczenia wykonane zostały dla krioprzepustu o danych przedstawionych punkcie 2.1. Wartość współczynnika oddawania ciepła z bocznej powierzchni toru prądowego do czynnika chłodzącego przyjęto  $k = 10 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ . Optymalne pole przekroju poprzecznego

krioprzepustu uzależnione jest od temperatury czynnika chłodzącego. Przy temperaturze czynnika chłodzącego  $\vartheta_k = -268^\circ C$  optymalny przekrój wynosi  $2,5 \text{ cm}^2$ , zaś przy temperaturze  $\vartheta_k = -193^\circ C$  wynosi  $2,85 \text{ cm}^2$ .



### 3. OPTIMALIZACJA KRIOPRZEPUSTU Z TOREM PRĄDOWYM WYKONANYM W POSTACI LINKI MIEDZIANEJ

Znaczne zwiększenie intensywności chłodzenia w krioprzepustach chłodzonych równolegle można uzyskać zastępując tor prądowy wykonany w postaci pręta miedzianego torem prądowym wykonanym w postaci linki. Pozwala to na dalsze, znaczne obniżenie strumienia cieplnego, wnিকającego poprzez krioprzepust do kriostatu.

Przeprowadźmy analizę porównawczą stanu cieplnie ustalonego toru prądowego wykonanego z okrągłego drutu z torem prądowym, w którym okrągły drut zastąpiono linką składającą się z  $N$  okrągłych drutów, przy następujących założeniach:

- polo powierzchni przekroju poprzecznego drutu i linki są jednakowe,
- jednakowe są pola powierzchni przekroju poprzecznego poszczególnych przewodów linki
- tor prądowy chłodzony jest na całej długości czynnikiem chłodzącym o stałej temperaturze,
- każdy przewód linki na całej swej powierzchni styka się z czynnikiem chłodzącym.

Przyjęto również stałą wartość przewodności cieplnej właściwej materiału toru prądowego, stałość współczynnika oddawania ciepła do czynnika chłodzącego oraz liniową zależność rezystywności materiału toru prądowego od temperatury.

Przy podanych założeniach rozkłady temperatur wzdłuż długości krioprzepustu są jednakowe we wszystkich przewodach linki, a opisuje je równanie różniczkowe (9), w którym współczynniki  $a^2$  oraz  $b$  wynoszą odpowiednio:

$$a^2 = \frac{ku_1 - \alpha p_0 s_1}{\lambda s_1}, \quad b = \frac{p_0 s_1 + ku_1 \vartheta_k}{\lambda s_1}, \quad \frac{b}{a^2} = \frac{p_0 s_1 + ku_1 \vartheta_k}{ku_1 - \alpha p_0 s_1},$$

gdzie:

$u_1$  - obwód pojedynczego przewodu linki,

$s_1$  - pole przekroju poprzecznego pojedynczego przewodu linki.

Rozwiązaniem równania różniczkowego (9) jest wyrażenie (10) wyprowadzone przy warunkach brzegowych:  $\vartheta(x=0) = \vartheta_1$ ,  $\vartheta(x=1) = \vartheta_2$ .

Moc cieplną przedostającą się poprzez pojedynczy przewód linki do kriostatu oblicza się podobnie jak poprzednio z relacji:

$$P_{21} = -\lambda s_1 \left. \frac{d\vartheta(x)}{dx} \right|_{(x=l)}, \quad (11)$$

zaś całkowitą moc cieplną wpływającą do kriostatu ze wzoru:

$$P_2 = N P_{21},$$

gdzie:

$N$  - liczba przewodów zawartych w lince.

Wyrażenie na moc cieplną przepływającą przez pojedynczy przewód linki do kriostatu podane jest zależnością:

$$P_{21} = \sqrt{2\pi^{0,5} k \lambda (s_1)^{1,5} + \alpha \lambda I_1^2 \rho_0} \left( (\vartheta_1 - c) \frac{l}{\sinh(dl)} - (\vartheta_2 - c) \operatorname{ctgh}(dl) \right),$$

gdzie:

$$c = \frac{I_1^2 \rho_0 + 2\pi^{0,5} k (s_1)^{1,5} \vartheta_k}{2\pi^{0,5} k (s_1)^{1,5} - \alpha I_1^2 \rho_0}, \quad (12)$$

$$d = \sqrt{\frac{2\pi^{0,5} k (s_1)^{1,5} - \alpha I_1^2 \rho_0}{\lambda (s_1)^2}},$$

$$s_1 = \frac{s}{N}, \quad I_1 = \frac{I}{N}, \quad u_1 = \sqrt{2\pi^{0,5} s_1^{0,5}},$$

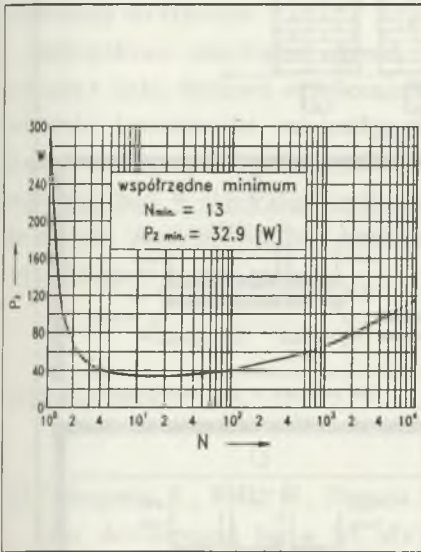
przy czym  $s$  jest całkowitym polem przekroju poprzecznego toru prądowego.

Przeprowadzono obliczenia dla krioprzepustu miedzianego o długości 100 cm, obciążonego prądem 1000 A przy współczynniku oddawania ciepła do czynnika chłodzącego  $10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ . Temperatury na końcach krioprzepustu wynosiły odpowiednio  $30^\circ\text{C}$  i  $-268^\circ\text{C}$ , zaś temperatura czynnika chłodzącego  $-193^\circ\text{C}$ . W obliczeniach przyjęto, że całkowite pole przekroju poprzecznego linki jest stałe i wynosi  $1,5 \text{ cm}^2$ , zaś jako zmienny parametr przyjęto liczbę przewodów linki  $N$ .

Na rys. 5 przedstawiono zależność mocy cieplnej wchodzącej do kriostatu  $P_2$  w funkcji liczby przewodów w lince  $N$ , przy stałym całkowitym przekroju linki  $s$ .

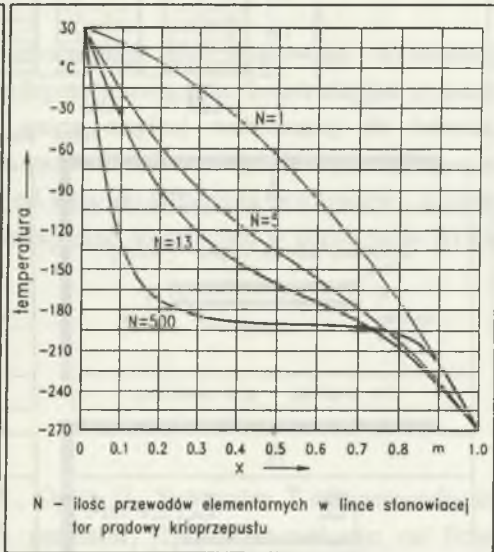
Z przedstawionego wykresu widać, że zastąpienie toru prądowego wykonanego w postaci pręta linką składającą się z kilku przewodów powoduje bardzo silne obniżenie wartości mocy cieplnej wchodzącej do kriostatu. W przypadku linki składającej się z 13 przewodów moc ta osiąga wartość minimalną, wynoszącą 32,9 W.

Na rys. 6 przedstawiono przebiegi temperatur na długości toru prądowego dla kilku wybranych linek o liczbie przewodów  $N = 1, 5, 13, 500$  i stałym całkowitym polu przekroju poprzecznego  $s = 1,5 \text{ cm}^2$ . W przypadku linki o dużej liczbie przewodów (np.  $N = 500$ ) obserwuje się w części środkowej krioprzepustu na znacznym odcinku długości stałość temperatury, co świadczy o braku przepływu mocy cieplnej wzdłuż toru prądowego. Moc cieplna wchodząca do kriostatu pochodzi z wymiany ciepła między torem prądowym a czynnikiem chłodzącym w pobliżu zimnego końca na odcinku krioprzepustu, w którym temperatura toru prądowego jest mniejsza od temperatury czynnika chłodzącego.



Rys.5. Zależność mocy cieplnej wchodzącej do kriostatu od liczby przewodów linki

Fig.5. Thermal power entering the cryostat as a function of the number of wire conductors

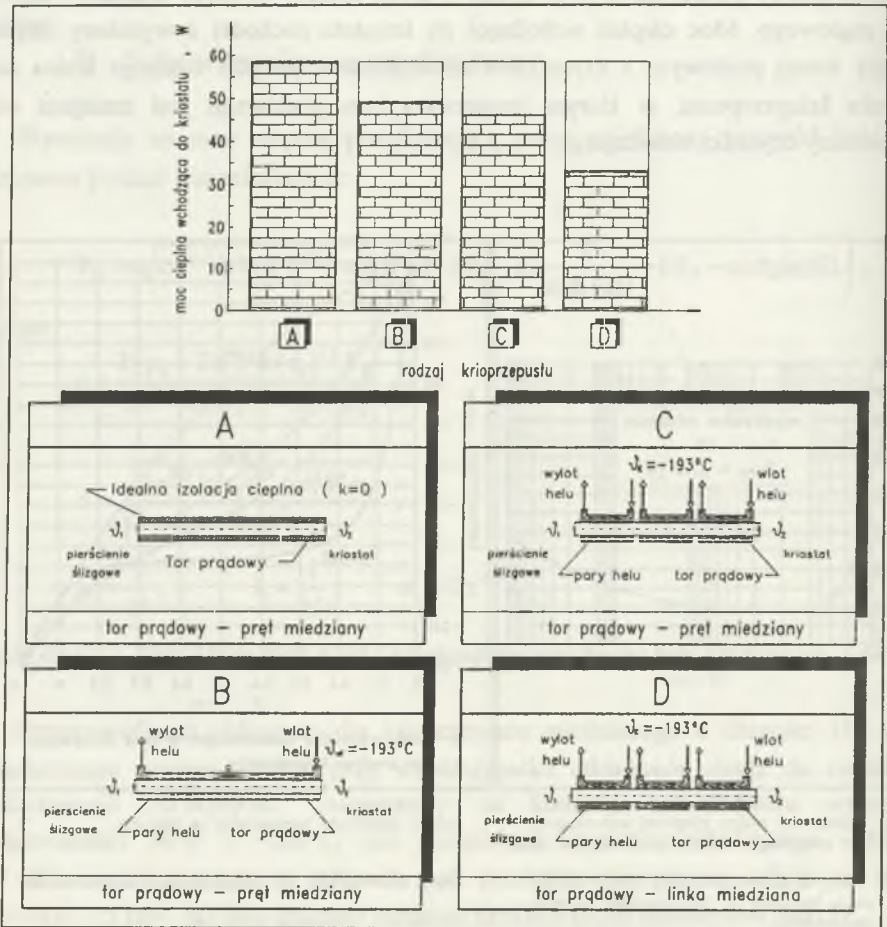


Rys.6. Rozkłady temperatur w linkach

Fig.6. Distribution of temperatures in the wires

## 4. WNIOSKI

W artykule przedstawiono różne typy krioprzepustów mogących znaleźć zastosowanie przy wykonywaniu połączeń między pierścieniami ślizgowymi a nadprzewodnikowym uzwojeniem wzbudzenia w krioturbogeneratorach. Na rys. 7 podano w formie wykresu wartości mocy cieplnych, jakie w przypadku poszczególnych rozwiązań konstrukcyjnych krioprzepustów przedostają się za pośrednictwem toru prądowego do kryostatu maszyny.



Rys. 7. Zależność mocy cieplnej wchodzącej do kryostatu od rodzaju krioprzepustu

Fig. 7. Thermal power entering the cryostat as a function of the type of cryogenic lead

Z przedstawionego wykresu widać, że zwiększenie intensywności chłodzenia toru prądowego poprzez zastosowanie lepszych metod chłodzenia (zastąpienie chłodzenia szeregowego równoległym) oraz zwiększenie powierzchni oddawania ciepła do czynnika chłodzącego (zastąpienie pręta miedzianego linką) pozwala na istotne ograniczenie ciepła wnikającego do kriostatu. Samo zwiększenie intensywności chłodzenia nie przynosi jednak pożądanych rezultatów, jeżeli nie dobierze się w odpowiedni sposób wymiarów toru prądowego lub liczby przewodów linki miedzianej (w przypadku toru wykonanego w postaci linki). Nieprawidłowo dobrane wymiary toru prądowego lub liczba przewodów linki mogą spowodować, że moc cieplna wchodząca do kriostatu w przypadku krioprzepustu chłodzonego jest równa, a nawet większa od mocy dostającej się w przypadku krioprzepustu izolowanego. Korzystanie z metod optymalizacji przedstawionych w artykule pozwala na właściwe projektowanie torów prądowych krioprzepustów, to znaczy taki dobór wymiarów toru prądowego względnie liczby przewodów linki stanowiącej tor, aby przy danym sposobie chłodzenia ograniczyć do wartości możliwie najmniejszej strumień ciepły wchodzący do kriostatu.

Szczegółowo omówiono sposób optymalizacji toru prądowego wykonanego w postaci linki. Stanowi on obecnie najlepsze rozwiązanie konstrukcyjne z punktu widzenia konieczności minimalizacji mocy cieplnej wchodzącej do kriostatu. Z przeprowadzonych analiz wynika, że zastosowanie toru prądowego wykonanego w postaci linki, w skład której wchodzi od kilku do kilkunastu przewodów, pozwala na znaczne obniżenie wartości ciepła wnikającego do kriostatu w porównaniu do toru wykonanego w postaci pręta.

## LITERATURA

- [1] Yamaguchi K., Maki N., Numata S., Ogata H., Senematsu T.: Superconducting rotor development for a 50 MVA generator; IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, nr 7, July 1984.
- [2] Mc Fee R.: Optimum input leads for cryogenic apparatus; The Review of Scientific Instr., vol. 38, nr.12, 1967.
- [3] Gędek W.: Przeciężalność krioprzepustów izolowanych; Konferencja naukowa "Kriotechnika w elektroenergetyce", Bielsko-Biała 1983.

- [4] Abramov G., Rozejn L.: Nieochładzemye tokowwody dla krioelektrotechnicznych ustrojstw. Elektrotechnika, nr 9, 1987.
- [5] Malkow M., Danilow. W.: Sprawocznik po fizikotechnicznych osnowom kriogeniki; Energoatomizdat, 1985.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994 r.

### Abstract

In the paper optimization methods of current paths of cryogenic leads being insulated and colled in series and in parallel are presented. Optimization method of cryogenic leads applied in novel cryoturbogenerators in which the current path is made in the form of a wire is presented.

A special attention is paid to the construction and solution of the mathematical model describing a thermally steady in a cryogenic lead being colled in parallel with a current path made in the form of a wire. The relation (12) shows the relationship of thermal power  $P_2$  entering through the described type of cryogenic lead to the cryostat of a superconducting generator to the number  $N$  of conductors in the wire of the current path. On the basis of the presented relation the optimum number of conductors in the wire of the current path, at a given temperature of the cryogenic lead coolant, can be defined.

The performed comparative analysis of various types of cryogenic leads shows available possibilities to limit the thermal power entering the cryostat by changing the cooling systems as well as the current paths of the cryogenic leads.