

Edmund PIĘTKA

Instytut Elektroenergetyki  
i Sterowania Układów

Politechniki Śląskiej

Zygmunt PIĄTEK

Instytut Podstawowych Problemów  
Elektrotechniki i Energoelektroniki

Politechniki Śląskiej

#### WYBRANE ZAGADNIENIA PRACY PRZEWODU KRIOOPOROWEGO

**Streszczenie.** Obecnie stosowane układy zasilania elektrotermicznych urządzeń dużej mocy charakteryzują się małą sprawnością. Powoduje to znaczne straty energii i podwyższa koszty produkcji. Jedną z możliwości rozwiązania zagadnienia są skompensowane prądowe tory krioporowe. Przeprowadzono analizę pracy przewodu krioporowego i przedstawiono wnioski praktyczne.

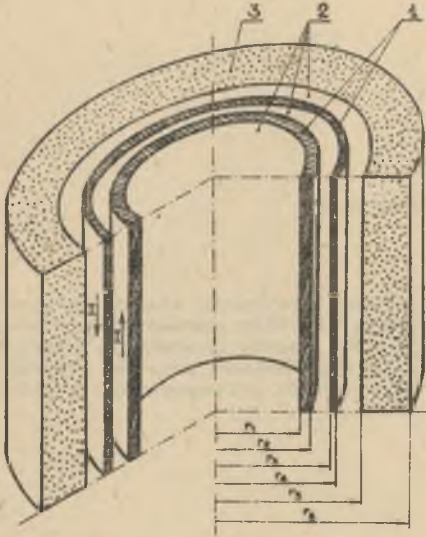
#### 1. WSTĘP

Problem zasilania odbiorników elektrycznych dużej mocy wynika z potrzeb przemysłu i sygnalizowany jest w literaturze krajowej i zagranicznej. W kraju obserwuje się trudności w doprowadzaniu energii do przemysłowych odbiorników dużej mocy. W przemyśle ohmicznym i hutniczym trudności te ograniczają w wielu przypadkach możliwość uzyskiwania produkcji na optymalnym poziomie. Obserwuje się również poważne straty energii elektrycznej w wyniku jej rozproszenia w torach prądowych o zagęszczonych strumieniach mocy. Straty te, obok poważnych kosztów, powodują skutki termiczne ograniczające doprowadzenie energii do odbiorników. Powoduje to w wielu energochłonnych zakładach przemysłowych straty produkcji przekraczające niekiedy setki milionów złotych w skali rocznej.

Problem optymalnego zasilania wobec rozwijającej się ohemii i hutnictwa nabiera dla tych gałęzi przemysłu coraz większej aktualności i znaczenia gospodarczego. Jednym z obiecujących rozwiązań tego problemu są prądowe przewody krioporowe. Wykazują one małą rezystywność, która prowadzi do zmniejszenia strat Joule'a i w rezultacie umożliwia znaczne zwiększenie zdolności przesyłania mocy. Specjalne konstrukcje tych przewodów w postaci torów krioporowych skompensowanych pozwalają na znaczne oszczędności energii elektrycznej, poprzez likwidację strat energii rozproszenia. Zaleta ta ma istotne znaczenie ekonomiczne, pozwala zmniejszać energochłonność produkcji i uzasadnia aktualność tematu.

## 2. PRZEWÓD KRIOOPOROWY SKOMPENSOWANY

Problem wykorzystania efektów zjawisk występujących w oziębionych do niskich temperatur przewodach nabiera coraz większego znaczenia dla współczesnej elektroenergetyki zawodowej i przemysłowej. Jednym ze skutecznych rozwiązań praktycznych, zmierzających do ograniczenia strat energii roz-

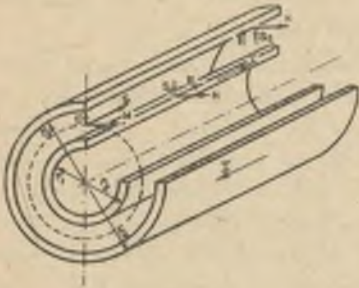


Rys. 1. Przewód krioporowy skompensowany

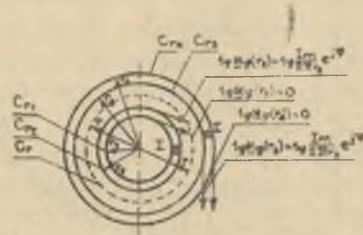
1 - przewodniki z aluminium o wysokim stopniu czystości metalu, 2 - ciekły azot, 3 - perlitowo-próżniowa izolacja termiczna

proszczenia w przewodnikach o zagęszczonych strumieniach mecy, jest stosowanie prądowych skompensowanych torów krioporowych. Na rys. 1 przedstawiono doświadczalny jednofazowy przewód krioporowy chłodzony ciekłym azotem. Przewodnik stanowi dwa współśrodkowe cylindry aluminiowe, w których wymuszony jest jednakowy od do wartości prąd przemienny 50 Hz, płynący w przeciwnych kierunkach. Cylindry zanurzone w ciekłym azocie w izolowanym termicznie kanale o promieniu wewnętrznym  $r_5$  stanowią skompensowany przewód krioporowy. Prędy zadanych wymuszeń prądowych straty Joule'a w cylindrach zależne są od grubości ich ścian, stopnia czystości metalu i temperatury. Straty mecy odprowadzane są w postaci ciepła z powierzchni cylindrów do kriocieczy, a dopuszczalną ich wartość określają zjawiska zachodzące w procesie wymiany ciepła. Parametry elektryczne przewodników można określić w oparciu o wyniki analizy pola elektromagnetycznego w obszarze kanału przewodu krioporowego. Analiza teoretyczna na modelu matematycznym, złożonym z równań Maxwella i teorii równań Bessela oraz teorii Peyttinga, wykonana dla krioprzewodnika (rys. 2) przy określonych prawem Ampera warunkach brzegowych (rys. 3), dała istotne informacje o tych przewodnikach [5].

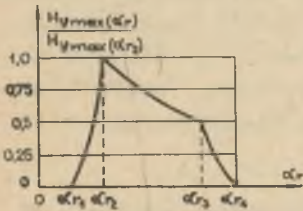
Charakterystyczną z nich jest rozkład wektorów natężenia pola magnetycznego w kanale przewodu krioporowego, w zależności od wymiarów cylindrów ( $r_1, r_2, r_3, r_4$ ), stopnia czystości ich metalu i temperatury. Rozkład tego natężenia w obszarze cylindrów jak również w przestrzeni zawartej między nimi w odniesieniu do natężenia pola magnetycznego na powierzchni zewnętrznej cylindra o promieniu  $r_2$  pokazano na rys. 4.



Rys. 2. Wektory natężenia pola elektrycznego i magnetycznego oraz wektory strumienia zespolonej mocy w przewodniku kriogenicznie skompensowanym [5]

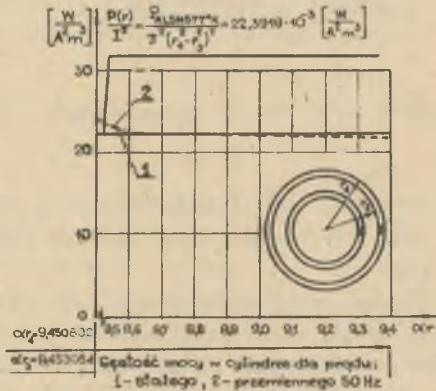


Rys. 3. Warunki brzegowe dla wektora natężenia pola magnetycznego dwóch cylindrów współśrodkowych wiodących taki sam prąd  $i(t) = I_m \cos(\omega t + \psi)$ , skierowany w kierunkach przeciwnych [5]



Rys. 4. Rozkład wektora względnego natężenia pola magnetycznego w obszarze dwóch cylindrów współśrodkowych wiodących prąd w kierunkach przeciwnych, w zależności od parametru  $\alpha_r$  ( $\alpha_r = \sqrt{\omega \mu / \rho(T)}$ ) [5]

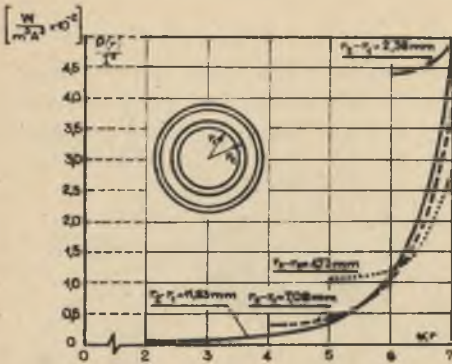
$\omega$  - pulsacja,  $\mu$  - przenikalność magnetyczna,  $\rho(T)$  rezystywność jako funkcja temperatury



Rys. 5. Rozkład gęstości wektorów względnej mocy Joule'a w aluminiowym (Al99,9995) cylindrze zewnętrznym krioprzewodnika skompensowanego [5]. Wymiary cylindra;  $r_f = 20$  mm;  $r_k = 22$  mm; rezystywność metalu  $\rho_{Al77K} = 0,221 \cdot 10^{-8} \Omega m$ ; wartość parametru  $\alpha = 422,652$  1/m

Zerowa wartość wektora natężenia pola magnetycznego na zewnętrznej powierzchni przewodnika skompensowanego jest istotną zaletą tego rodzaju przewodników. Związane z polem rozproszenia straty mocy czynnej w metalowej osłonie termicznej przewodu, przyjmują w rozpatrywanym przypadku zerową wartość i poprawiają sprawność przesyłu energii. O sprawności przesyłu energii decyduje również rozkład wektorów gęstości mocy Joule'a w przekroju ścian cylindrów. Rozkład gęstości tej mocy, zależny jest od grubości ścian





Rys. 6. Rozkład gęstości względnej mocy Joule'a w aluminiowych (Al99, 9995) cylindrach wewnętrznych krioprzewodników skompensowanych z prądem przemiennym 50 Hz, w zależności od grubości ich ścian [5]. Rezytywność metalu  $\rho_{Al77K} = 0,221$

$\cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$ ; wartość parametru  
 $\alpha = 422,652 \text{ 1/m}$

zjawisk termicznych zachodzących w procesie wymiany ciepła w przewodzie.

### 3. STRUMIENIE CIEPŁA ODPROWADZANY Z POWIERZCHNI PRZEWODNIKÓW DO KRIOCIECZY ORAZ KRYTYCZNE I DOPUSZCZALNE WARTOŚCI PRĄDU

Warunki wymiany ciepła między ośrodkiem chłodzenia i przewodnikiem zależne są od oporu cieplnego na jaki napotyka strumień cieplny przy przejściu z powierzchni metalu do kriocieczy. Przepływ ciepła przy wrzeniu kriocieczy można określić, ustalając zależność strumieniem cieplnym  $q$  a nadwyżką temperatury  $\Delta T$ , będącą miarą przegrzania cieczy

$$\dot{q} = q(\Delta T) \quad (1)$$

Strumień ciepła  $\dot{q} [\text{W/m}^2]$  odniesiony jest do czasu i powierzchni, na której następuje wrzenie, natomiast argument  $\Delta T$  stanowi nadwyżkę temperatury  $T_p$  ściany grzejnej ponad temperaturę nasycenia  $T_s$  kriocieczy ( $\Delta T = T_p - T_s$ ). Maksymalna wartość jednostkowego strumienia ciepła na powierzchni przewodników krioporewych wiąże się ze specyficznymi zjawiskami fizycznymi ruchu pary w kierunku od powierzchni przewodnika do kriocieczy i ruchu kriocieczy w kierunku odwrotnym. Zjawiska te wyjaśnia teoria stabilności powierzchni rozdziału faz: ciekłej i gazowej dla procesu zachodzącego w warunkach quasi-ustalonych. Dla przypadku lokalnego zagęszcze-

nia strumienia ciepłego w teorii stabilności rozpatrywane są warunki powstawania pęcherzyków, z których utworzony strumień pary zaczyna przeszkadzać napływowi cieczy do powierzchni przewodnika w sposób na tyle znaczny, że ciecz nie może dość dobrze zwilżać powierzchni grzewczej. W rozważaniach teoretycznych zakłada się równość potencjałów termodynamicznych obydwóch faz, a warunek ten w literaturze nazywany jest warunkiem stabilności Helmholtza. Na związek zjawisk stabilności hydrodynamicznej i krytycznego strumienia ciepła przy wrzeniu pęcherzykowym wskazał Kutatieleadze [1]. Jednak teorię tego zjawiska, zwanego także pierwszym kryzysem wrzenia, przedstawili pierwsi Zuber [2], Chang [3] i Bereson [4]. Proces wrzenia pęcherzykowego różnych cieczy niskotemperaturowych a w tym także azotu stanowił przedmiot badań wielu autorów i to zarówno na drodze eksperymentalnej, jak i teoretycznej. Badania krytycznych gęstości strumienia ciepła na powierzchniach grzejnych w ciekłym azocie charakteryzują się znaczną rozbieżnością wyników [5]. Z tego też powodu przyjęcie którejkolwiek z podanych w literaturze wartości krytycznego strumienia ciepła dla aluminiowych krioprzewodników, bez uprzednich pomiarów własnych, byłoby nieuzasadnione. Badania wykonane na modelu krioporowego przewodu w skali przemysłowej, polegające na pomiarach strat mocy czynnej w przewodnikach z prądem i pomiarach przyrostów temperatur na ich powierzchni, pozwoliły określić zależności [5]:

$$\dot{q}_A = 10^3 \cdot \Delta T^{1,48}, \quad 0,2 \leq \Delta T \leq 2 \quad (2)$$

$$\dot{q}_A = 523 \cdot 10^4, \quad \Delta T^{2,42}, \quad 2 \leq \Delta T \leq 3,6 \quad (3)$$

$$\dot{q}_A = 524 \cdot 10^4 \cdot \Delta T^{2,42}, \quad 3,6 \leq \Delta T \leq 9,5 \quad (4)$$

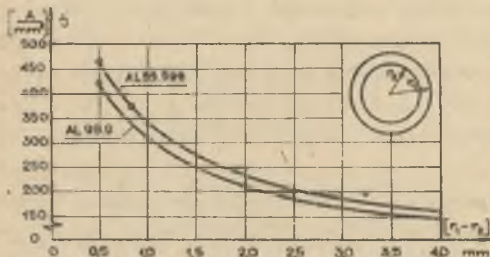
Mogą one stanowić podstawę do oceny przyrostu temperatury przewodników w ciekłym azocie, w zależności od jednostkowej gęstości strumienia ciepła ( $W/m^2$ ) na ich powierzchni. Maksymalne wartości strumienia ciepła  $\dot{q}_d = 1217 \cdot 10^2 W/m^2$  i przyrostu temperatury  $\Delta T = 9,5 K$ , sprawdzone doświadczalnie [5], mogą być proponowane jako wartości dopuszczalne dla przewodników walcowych i cylindrycznych w ciekłym azocie. Pomiary krytycznych przyrostów temperatury i gęstości strumienia ciepła dały wyniki, które można uznać jako przybliżone. Wykonano na przewodnikach w stanie możliwie najbardziej zbliżonym do krytycznego, otrzymując wyniki dla gęstości strumienia ciepła  $153 \cdot 10^3 \dots 172 \cdot 10^3 W/m^2$  i przyrostu temperatury  $13,6 \dots 14,8 K$ . Krytyczne i dopuszczalne gęstości strumienia ciepła na powierzchni krioprzewodników określają ich krytyczne i dopuszczalne wartości prądu w postaci:

$$I_k = \sqrt{\frac{F \dot{q}_{Tmax}}{R_{Tk}}}, \quad (5)$$

$$I_d = \sqrt{\frac{F \dot{q}_d}{R_{Td}}}, \quad (6)$$

gdzie:

- $F$  - powierzchnia grzejna na jednostkę długości przewodnika,
- $\dot{q}_{I_{max}}, \dot{q}_d$  - krytyczna i dopuszczalna gęstość strumienia ciepła na powierzchni przewodników,
- $R_{Tk}, R_{Td}$  - rezystancje przewodników w temperaturze krytycznej  $T_k = (77,35 + 13,5)K$  i dopuszczalnej  $T_d = (77,35 + 9,5)K$ .



Rys. 7. Dopuszczalne gęstości prądu prądu przemianego 50 Hz w aluminiowych prostoliniowych przewodnikach cylindrycznych w ciekłym azocie, w zależności od grubości ich ścian [5]. Krzywe z obliczeń i pomiarów; o - punkty doświadczalne

Wyniki eksperymentalne dopuszczalnych gęstości prądu w aluminiowych przewodnikach cylindrycznych, o zróżnicowanym stopniu czystości metalu, pokazano na rys. 7.

Duża obciążalność krioporewych przewodów skompensowanych pozwala rozwiązywać problemy zasilania energochłonnych odbiorników i stanowi ich istotną zaletę.

#### 4. WNIOSKI

1. Celowość stosowania przewodów krioporewych w zakładach ohmicznych i hutniczych dyspensujących w dostatecznych ilościach ciekłym azotem jest uzasadniona wobec kosztów strat produkcji, spowodowanych trudnościami w optymalnym zasilaniu odbiorników elektretermicznych.
2. Na podstawie badań innych Autorów [6,7] można stwierdzić, że stosowanie aluminiowych przewodników jako żył prądowych terów krioporewych jest technicznie uzasadnione. Opanowana technologia strefowego oczyszczenia tego metalu pozwala na produkcję wysoko czystych przewodników aluminiowych o dużym współczynniku temperaturowych zmian rezystywności.
3. Efekty termiczne prądu w aluminiowych przewodnikach zanurzonych w ciekłym azocie zależne są od ich konfiguracji, czystości metalu i jego struktury krystalicznej. Rozmiary powierzchni wymiany ciepła i stopień jej zwilżalności kriocieczą decydują o prądowej obciążalności przewodnika, ograniczonej dopuszczalnym przyrostem jego temperatury.
4. Wykorzystanie techniki niskich temperatur w konstrukcji skompensowanego toru krioporewego stanowi korzystne, pod względem technicznym, rozwiązanie przesyłu energii. Zapewnia ono symetryzację toru i praktycznie całkowicie redukuje pole magnetyczne, straty energii rozproszenia i jej skutki termiczne.



## LITERATURA

- [1] Kutatışladze S.S.: Hidrodinamiozeskaja teorija izmieniënija režima kipiënija žydkosti pri swobodnoj konwekcoji. Akademia Nauk ZSRR, Moskwa 1969.
- [2] Zuber N.: On the stability of boiling heat transfer. Trans. ASME, 80, nr 3, ss. 711-720, 1968.
- [3] Chang Y.: Heat transfer in saturated boiling. ASME A.I.c.E Heat Transf. Conf. Strorrs, Connecticut, Chem., Energ., 1960
- [4] Beresen J.: Advances in Heat Transfer. ASME nr 3, str. 13, 1963.
- [5] Piętka E.: Badania współzależności między parametrami elektrycznymi i cieplnymi na wybranych modelach aluminiowych przewodników kriopero-wych w temperaturze ciekłego azotu. Praca doktorska, Politechnika Śląska 1979 (niepublikowana).
- [6] Scott R.B.: Technika Niskich Temperatur. WNT, Warszawa 1963.
- [7] Małkow M.P.: Sprawocznik po fizyko-technicznych osnewam kriogeniki. Moskwa 1973.

Wpłynęło do Redakcji dnia 20.VI.1980 r.

Recenzent:

Prof. dr hab. inż. Czesław Królikowski

## ВЫБРАННЫЕ ВОПРОСЫ РАБОТЫ КРИОРЕЗИСТИВНОГО ТОКОПРОВОДА

## Р е з ю м е .

Применяемые в настоящее время системы питания электротермических устройств большой мощности характеризуются малым коэффициентом полезного действия. Это вызывает большие потери энергии и увеличивает производственные расходы. Одной из возможностей решения вопроса являются скомпенсированные токовые линии криосопротивления. Проведен анализ работы криосопротивления провода и представлены практические предложения.

## THE LARGE CURRENT CRIORESISTIVE TRACKS

## S u m m a r y

The heavy-current electro-thermic supply systems used nowadays are characteristic of low efficiency. It causes dangerous losses of energy and raises the production costs. One of the possibilities of solving the problem is designing the compensated electric cryo-resistance leads. The analysis of an electric cryo-resistance lead operation has been performed and the practical conclusions have been presented.