

Aleksander SZENDZIELORZ

Edmund PIĘTKA

Instytut Elektroenergetyki  
i Sterowania Układów  
Politechnika Śląska

PRĄDOWE TORY KRIOOPOROWE SKOMPENSOWANE  
DO ZASILANIA PRZEMYSŁOWYCH URZĄDZEŃ  
DUŻEJ MOCY

Streszczenie. Obecnie stosowane układy zasilania urządzeń elektrotermicznych 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

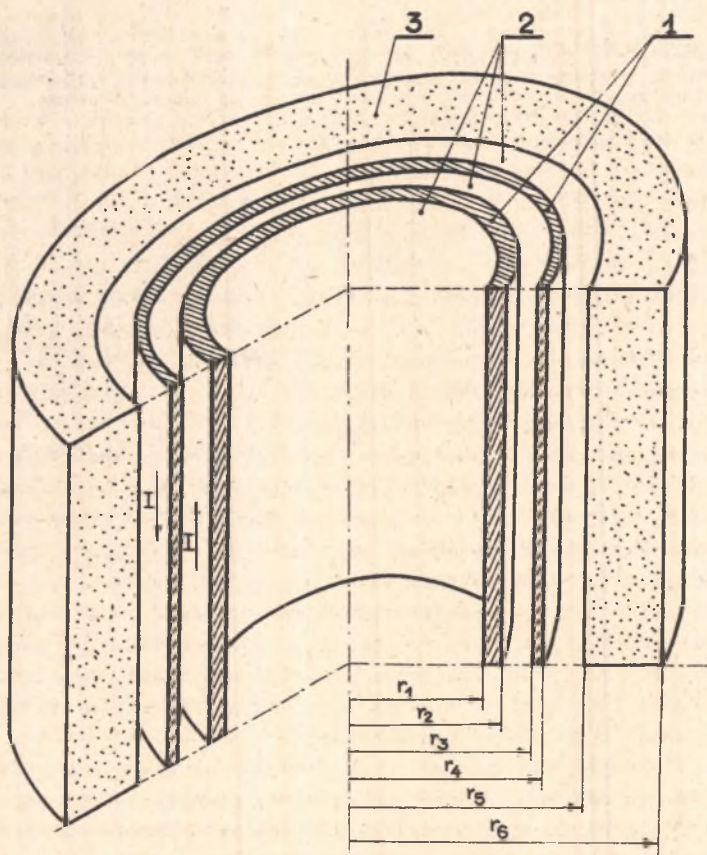
Problem zasilania odbiorników elektrycznych dużej mocy wynika z potrzeb przemysłu i sygnalizowany jest w literaturze krajowej i zagranicznej. W kraju obserwuje się trudności w doprowadzaniu energii do przemysłowych elektrotermicznych odbiorników dużej mocy. W przemyśle chemicznym i hutniczym trudności te ograniczają w wielu przypadkach możliwość uzyskiwania optymalnych poziomów wytwarzania produktów. Obserwuje się również poważne straty energii elektrycznej w wyniku jej rozproszania w torach prądowych o zagęszczonych strumieniach mocy. Ujemną cechą tych strat obok poważnych kosztów są ich skutki termiczne ograniczające doprowadzanie energii do odbiorników. Straty energii oraz limitowane jej skutkami termicznymi możliwości optymalnego zasilania, powodują w wielu energochłonnych zakładach przemysłowych w kraju, straty produkcji przekraczające setki milionów złotych. Problem optymalnego zasilania, wobec rozwijającej się chemii 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 ponadto na znaczne oszczędności ener-

gii elektrycznej, poprzez likwidację strat energii rozproszenia. Zaleta ta ma istotne znaczenie ekonomiczne, pozwala zmniejszyć energochłonność produkcji i uzasadnia aktualność tematu.

## 2. PRZEWÓD KRIOOPOROWY SKOMPENSOWANY

Problem wykorzystania efektów zjawisk w oziębionych do niskich temperatur metalach nabiera coraz większego znaczenia dla współczesnej elektroenergetyki zawodowej i przemysłowej. Jednym ze skutecznych rozwiązań praktycznych, zmierzających do opanowania strat energii rozproszenia w przewodnikach o zagęszczonych strumieniach mocy, jest stosowanie prądowych skompensowanych torów krioporowych. Na rys. 1 przedstawiono doświadczalny jednofazowy przewód krioporowy, chłodzony ciekłym azotem.

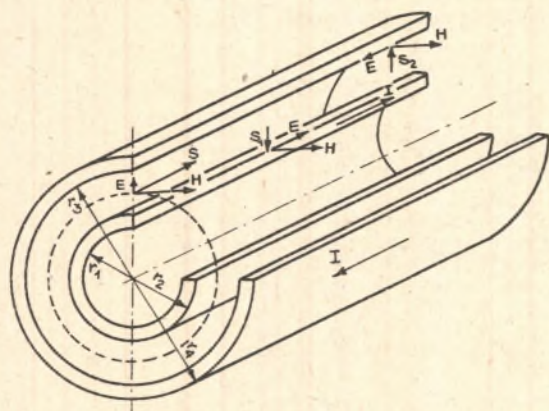


Rys. 1. Przewód krioporowy skompensowany

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



Przewodnik stanowią dwa współśrodkowe cylindry aluminiowe, w których wymuszony jest jednakowy co do wartości prąd przemienny 50 Hz, skierowany w kierunkach przeciwnych. Cylindry zanurzone w ciekłym azocie w izolowanym termicznie kanale o promieniu  $r_5$ , stanowią skompensowany przewód krioporowy. Przy zadanych wymuszeniach prądowych, straty Joule'a w cylindrach, zależne są od grubości ich ścian, stopnia czystości metalu i temperatury. Straty mocy odprowadzane są w postaci ciepła z powierzchni cylindrów do kriocieczy, a dopuszczalna 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 Poyntinga, wykonana dla krioprzewodnika (rys. 2) przy określonych prawem Ampere'a warunkach brzegowych (rys. 3), dała istotne o tych przewodnikach informacje [5].

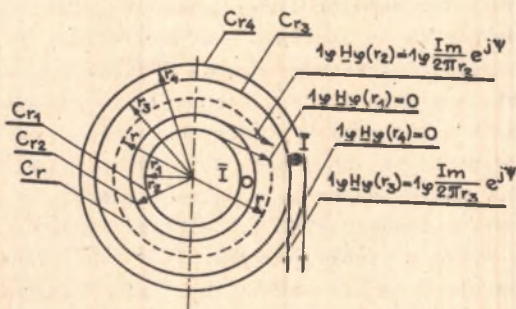


Rys. 2. Wektory natężenia pola elektrycznego i magnetycznego oraz wektory strumienia zespolonej mocy w przewodniku krioporowym skompensowanym [5]

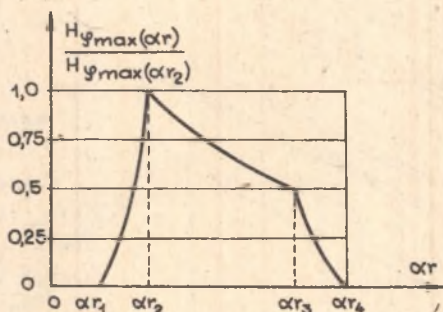
Rozkład tego natężenia w obszarze cylindrów, jak również w przestrzeni zawartej między nimi, w odniesieniu do natężenia pola magnetycznego na powierzchni zewnętrznej cylindra o promieniu  $r_2$ , pokazano na rys. 4.

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 decydują również straty mocy Joule'a, związane z rozkładem jej gęstości w przekroju ścian cylindrów. Rozkład gęstości tej mocy zależny jest od grubości ścian cylindrów, stopnia czystości ich metalu i temperatury. Zależność zilustrowano rysunkami 5 i 6.

Ekonomiczne wykorzystanie cylindrycznych krioprzewodników jest tym większe im bardziej równomierny jest rozkład gęstości strat mocy Joule'a w



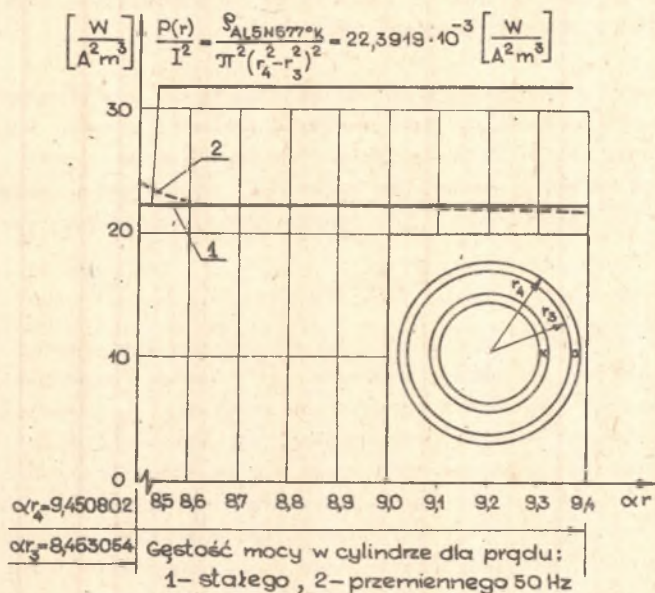
Rys. 3. Warunki brzegowe dla wektora natężenia pola magnetycznego dwóch cylindrów współśrodkowych wiodących taki sam prąd  $i(t) = I_m \cdot \cos(\omega t + \psi)$ , skierowany w kierunkach przeciwnych [5]



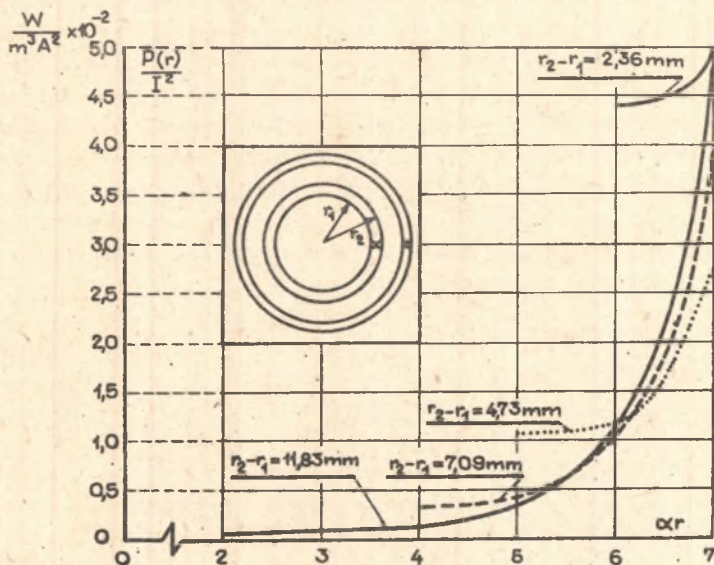
Rys. 4. Rozkład wektora natężenia pola magnetycznego w obszarze dwóch cylindrów współśrodkowych wiodących prąd w kierunkach przeciwnych w zależności od parametru  $\alpha r$  ( $\alpha r = \sqrt{\frac{\omega \mu}{\rho(T)}}$  [5];  $\omega$  - pulsacja,  $\mu$  - przenikalność magnetyczna,  $\rho(T)$  - rezystywność jako funkcja temperatury)

przekrojach ich ścian. Wraz ze zmniejszaniem się grubości ścian maleje efekt nasłórkowy prądu, którego współczynnik  $R/R_0$  dla cienkościennych cylindrów (2 mm) osiąga, w zależności od czystości aluminium, doświadczalnie sprawdzone wartości 1.01...1.006. Krioprzewodniki skompensowane były przedmiotem badań doświadczalnych, realizowanych na modelu fizycznym w skali przemysłowej [5]. Celem tych badań było określenie podstawowych zjawisk termicznych, zachodzących w procesie wymiany ciepła w przewodzie.





Rys. 5. Rozkład gęstości wektorów mocy Joule'a w aluminium (AL99,9995) cylindrze zewnętrznym krioprzewodnika skompensowanego [5]. Wymiary cylindra:  $r_3 = 20$  mm,  $r_4 = 22$  mm, rezystywność metalu  $\rho_{\text{AL77}^\circ\text{K}} = 0,221 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$ , wartość parametru  $\alpha = 422,652$  1/m



Rys. 6. Rozkład gęstości mocy Joule'a w aluminium (AL99,9995) cylindrach wewnętrznych krioprzewodników skompensowanych z prądem przemiennym 50 Hz, w zależności od grubości ich ścian [5]. Rezystywność metalu  $\rho_{\text{AL77}^\circ\text{K}} = 0,221 \cdot 10^{-8} \Omega \text{m}$ , wartość parametru  $\alpha = 422,652$  1/m

### 3. STRUMIEŃ 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 między 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 ściany grzejnej  $T_p$  ponad temperaturę nasycenia  $T_g$  kriocieczy ( $\Delta T = T_p - T_g$ ). Maksymalna wartość jednostkowego strumienia ciepła na powierzchni przewodników krioporowych 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 zagezszczenia strumienia cieplnego, 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 Kutateladze [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 krioprowodników, 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]:

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

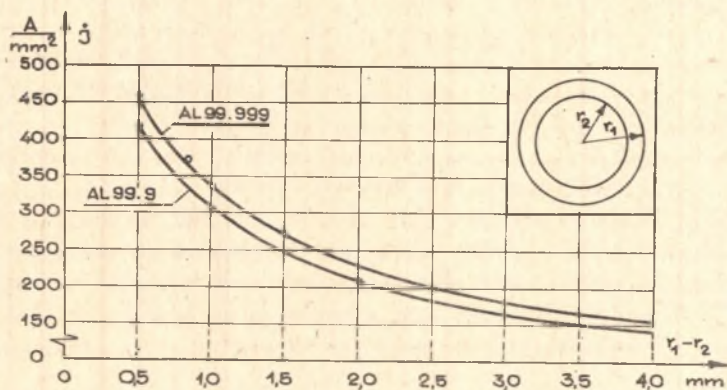
$$\dot{q}_A = 523 \cdot 10^{-4} T^{2,42}, \quad 2 \leq \Delta T \leq 3,6, \quad (3)$$

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

Mogą one stanowić podstawę do oceny przyrostu temperatury przewodników w ciekłym azocie, w zależności od jednostkowej gęstości strumienia ciepła na ich powierzchni. Maksymalne wartości strumienia ciepła  $\dot{q}_d = 12,17 \text{ W/cm}^2$  i przyrostu temperatury  $\Delta T = 9,5 \text{ K}$ , sprawdzone doświadczalnie [5] mogą być proponowane jako wartości dopuszczalne dla przewodników walcowych i cylindrycznych w ciekłym azocie. Pomiar krytycznego przyrostu temperatury i gęstości strumienia ciepła dały wyniki, które można uznać jako przybliżone. Wykonano je na przewodnikach w stanie możliwie najbardziej zbliżonym do krytycznego, otrzymując wyniki dla gęstości strumienia ciepła  $15,3 \dots 17,2 \text{ W/cm}^2$  i przyrostu temperatury  $13,6 \dots 14,8 \text{ K}$ . Krytyczne i dopuszczalne gęstości strumienia ciepła na powierzchni krioprzewodników, określają ich krytyczne i dopuszczalne wartości prądu w postaci:

$$I_k = \sqrt{\frac{F \cdot \dot{q}_{I\max}}{R_{TK}}}, \quad (5)$$

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



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



w której:

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

Wyniki eksperymentalne dopuszczalnych gęstości prądu w aluminiowych przewodnikach cylindrycznych o zróżnicowanym stopniu czystości metalu, pokazano na rys. 7. Duża obciążalność kriooporowych przewodów skompensowanych pozwala rozwiązywać problemy zasilania energochłonnych odbiorników i stanowi ich istotną zaletę.

#### 4. WNIOSKI

1. Celowość stosowania przewodów kriooporowych w zakładach chemicznych i hutniczych, dysponujących w dostatecznych ilościach ciekłym azotem, jest wobec kosztów strat produkcji - powodowanych trudnościami w optymalnym zasilaniu odbiorników elektrotermicznych - uzasadniona.

2. Na podstawie badań obcych [6] [7] można stwierdzić, że stosowanie aluminiowych przewodników jako żył prądowych torów kriooporowych jest technicznie uzasadnione. Opanowana technologia strefowego czyszczenia 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. Wielkość powierzchni wymiany ciepła i stopień jej zwilżalności kriocieczą, decyduje o prądowej obciążalności przewodnika, ograniczonej dopuszczalnym przyrostem jego temperatury.

4. Wykorzystanie techniki niskich temperatur w konstrukcji skompensowanego toru kriooporowego stanowi korzystne pod względem technicznym rozwiązanie przesyłu energii. Zapewnia ono symetryzację toru i praktycznie całkowicie redukuje zewnętrzne pole magnetyczne, straty energii rozproszenia i jej skutki termiczne.

5. Wyniki eksperymentalne dopuszczalnych gęstości prądu w aluminiowych przewodnikach cylindrycznych, pracujących w ciekłym azocie, wskazują na możliwość ponad stokrotnie efektywniejszego wykorzystania aluminium w porównaniu do pracy przewodów aluminiowych, pracujących w liniach napowietrznych lub kablowych w warunkach normalnych.



## LITERATURA

- [1] Kutatieładze S.S.: Gidrodinamiczeskaja teorija izmienienija režima kripienija žydkoati pri swobodnoj konwekcji. 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. Storrs, Connecticut, Chem., Energ. 1960.
- [4] Bereson J.: Advances in Heat Transfer. ASME nr 3, s. 13, 1963.
- [5] Piętka E.: Badania współzależności między parametrami elektrycznymi i cieplnymi na wybranych modelach aluminiowych przewodników kriopoporowych w temperaturze ciekłego azotu. Praca doktorska - Politechnika Śląska.
- [6] Scott R.B.: Technika Niskich Temperatur, WNT, Warszawa 1963.
- [7] Małkow H.P.: Sprawocznik po fizykotechnicznych osnovach kriogeniki, Moskwa 1973.

ТОКОВЫЕ ЛИНИИ КРИСОПРОТИВЛЕНИЯ СКОМПЕНСИРОВАННЫЕ  
ДЛЯ ПИТАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТРОЙСТВ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

## Р е з ю м е

В настоящее время системы питания электротермических устройств большой мощности характеризуется малым полезным действием. Это влияет на большие потери энергии и увеличивает себестоимость производства. Одной из возможностей устранения этого вопроса является скомпенсированные токовые линии криосопротивления. Произведено анализ работы криосопротивления провода и даны практические выводы.

THE COMPENSATED ELECTRIC CRYO-RESISTANCE LEADS FOR  
INDUSTRIAL HEAVY-CURRENT PLANTS SUPPLY

## 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.