

В.Г. ДАНЬКО, д-р техн. наук, проф., зав. каф., НТУ "ХПІ", Харків
Є.В. ГОНЧАРОВ, с.н.с., НТУ "ХПІ", Харків

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРИПЛИВІВ В КРІОСТАТ НАДПРОВІДНОГО ОБМЕЖУВАЧА СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

A heat leakage in cryostat of the fault current limiter with a superconducting winding is considered in the article. A technique for computation of thermal emissions in the cryostat is offered.

У статті розглянуто теплоприпливи у кріостат обмежувача струму короткого замикання з надпровідною обмоткою. Запропоновано метод розрахунку потужності тепловиділень у кріостаті.

В статье рассмотрены теплопритоки в криостат ограничителя тока короткого замыкания со сверхпроводящей обмоткой. Предложен метод расчета мощности тепловыделений в криостате.

Вступ. Покращення засобів захисту від аварійних струмів короткого замикання в електромережах є важливою і актуальною задачею. Підвищення безпеки і надійності роботи енергетичних комплексів скорочує витрати на відновлення та ремонт. Для захисту від струмів короткого замикання використовуються плавкі запобіжники, вимикачі, реактори та різні пристрої обмеження струму. Також набув розвитку такий напрям в електроенергетиці, як використання явища високотемпературної надпровідності (77 К).

Надпровідний обмежувач струму короткого замикання вмикається в частину мережі, яка передбачає захист від аварійних струмів. Такий пристрій має близький до нуля опір в номінальному режимі та збільшує його при проходженні струму короткого замикання, що і обмежує величину аварійного струму.

Метою роботи є аналіз припливів тепла у кріостат з надпровідною обмоткою, що є необхідним для визначення енерговитрат обмежувача струму короткого замикання у нормальному режимі роботи.

Принцип дії надпровідних обмежувачів струму короткого замикання полягає в тому, що при виникненні аварійного струму в електричне коло уводиться активний опір, чи індуктивний за рахунок втрати надпровідності, або іншим шляхом. За принципом дії надпровідні обмежувачі струму

можна розділити на дві основні групи: резистивні та індуктивні.

Конструкція надпровідного обмежувача струм містить струмонесучі надпровідникові елементи: масивні елементи, плівкові вставки, екрани або обмотки. Надпровідникові елементи охолоджуються до температури 4,2 К, якщо відносяться до низькотемпературних, або до 77 К для високотемпературних [1].

Аналіз припливів тепла в кріостат. Розглянемо особливості роботи високотемпературної надпровідної (ВТНП) обмотки обмежувача струму короткого замикання, які пов'язані з необхідністю її охолодження до температури рідкого азоту, що потребує наявності в конструкції кріостата. Кріостат повинен бути виготовлений з непровідного матеріалу, а між стінками кріостата, з метою зниження припливів тепла, закладена слоїсто-вакуумна ізоляція таким чином, щоб навколо середнього стержня осердя не утворювалися замкнені контури (рисунк). Це дає можливість зменшити зовнішні припливи тепла в кріостат до $q = 10-15 \text{ Вт/м}^2$ [51].

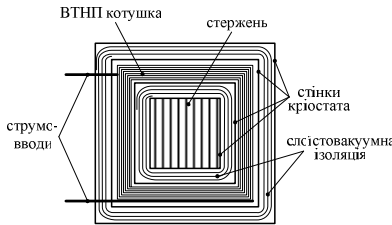


Рис. Поперечний переріз кріостата з ВТНП котушкою, розташованого на середньому стержні осердя.

Взагалі для того, щоб вивести тепло з кріостата і підтримувати в ньому температуру рідкого азоту (до 77 К), необхідно витратити на охолодження потужність на порядок більшу потужності тепловиділень (таблиця) [2].

Потужність тепловиділень має такі складові [3]:

$$P_{\text{тепл}} = P_{\text{зовн}} + P_{\text{гіст}} + 2P_{\text{св}}, \quad (1)$$

де $P_{\text{зовн}}$ – зовнішні припливи тепла крізь стінки кріостата; $P_{\text{гіст}}$ – гістерезисні втрати в проводах при перемагнічуванні; $P_{\text{св}}$ – приплив тепла по струмовводу довжиною l з перерізом S , зовнішня температура якого $T_1(x=0)$, а в кінці $T_2(x=l)$ – температура рідкого азоту.

Таблиця – Потужність рефрижератора для тепловідводу 1 Вт

Температура, К	Потужність, Вт
200	2
150	4
100	8
77	12
30	80
4	2000

Диференційне рівняння теплопровідності для такого струмовводу

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{\rho I^2}{\lambda S^2} = 0, \quad (2)$$

де I – струм, що проходить по струмовводу; ρ – питомий опір матеріалу струмовводу; λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу струмовводу.

Розв'язання диференціального рівняння (2) має такий загальний вигляд:

$$T = -\frac{\rho I^2}{\lambda S^2} \frac{x^2}{2} + A_1 x + A_2, \quad (3)$$

де A_1 і A_2 – сталі інтегрування, які визначаємо з крайових умов (при $x = 0$ $T = T_1$, при $x = l$ $T = T_2$):

$$T_1 = A_2; \quad T_2 = -\frac{\rho I^2}{\lambda S^2} \frac{l^2}{2} + A_1 l + T_1,$$

звідки $A_1 = \frac{1}{l} \left[\frac{\rho I^2}{\lambda S^2} \frac{l^2}{2} - (T_1 - T_2) \right]$.

Таким чином, за прийнятих крайових умов температура струмовводу

$$T = -\frac{\rho I^2}{\lambda S^2} \frac{x^2}{2} + \left[\frac{\rho I^2}{\lambda S^2} \frac{l^2}{2} - (T_1 - T_2) \right] \frac{x}{l} + T_1, \quad (4)$$

а приплив тепла по струмовводу в кріостат буде таким

$$P_{\text{св}} = -\lambda S \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=l} = \lambda S \left(\frac{\rho I^2}{2 \lambda S^2} l + \frac{T_1 - T_2}{l} \right) = \frac{\rho I^2}{2} \beta + \lambda \frac{T_1 - T_2}{\beta}, \quad (5)$$

де $\beta = l/S$ – параметр, що характеризує геометрію струмовводу. Від параметра β залежить приплив тепла в кріостат, мінімальне значення якого відповідає умові

$$\frac{dP_{\text{св}}}{d\beta} = 0, \text{ що дає } \frac{\rho I^2}{2} - \lambda \frac{T_1 - T_2}{\beta^2} = 0.$$

Звідси $P_{\text{свmin}}$ відповідає

$$\beta_{\text{опт}} = \frac{l}{S} = \sqrt{\frac{2\lambda(T_1 - T_2)}{\rho I^2}}, \quad (6)$$

а мінімальний приплив тепла на один струмоввод при цьому буде та-

КИМ

$$P_{\text{св min}} = I\sqrt{2\lambda\rho(T_1 - T_2)}. \quad (7)$$

Для одного мідного струмовводу це дорівнює (в інтервалі температур $T_1 = 290$ К, $T_2 = 80$ К)

$$P_{\text{св min}} = k_{\text{св}} I, \quad (8)$$

де $k_{\text{св}} = 0,04$ Вт/А.

Висновки. Запропоновано метод розрахунку припливів тепла в кріостат надпровідного обмежувача струму короткого замикання може бути використаний для розрахунку енерговитрат, що необхідно для оцінки енергоефективності такого приладу.

Список літератури: 1. Використання високотемпературної надпровідності в електроенергетичному обладнанні: монографія / В.Г. Данько, І.С. Полянська, Є.В. Гончаров; за ред. В.Г. Данько. – Х.: НТМТ, 2011. – 162 с. **2.** Тенденції розвитку і використання високотемпературних надпровідникових струмообмежувачів / Данько В.Г., Гончаров Є.В., Лисенко Л.І. та ін. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Тем. вип.: Прилади та методи неруйнівного контролю. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 38. – С. 35-44. **3.** Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. проф. М.П. Малкова // М.: Энергия. – 1973. – 392 с.



Данько Володимир Григорович – доктор технічних наук, професор. Завідувач кафедри загальної електротехніки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Наукові інтереси пов'язані з проблемами у галузі нагрівання і охолодження традиційних електричних машин та розроблення надпровідних машин.



Гончаров Євген Вікторович. Захистив диплом інженера в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за фахом електричні машини і апарати у 2004 р. Молодший науковий співробітник кафедри загальної електротехніки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Наукові інтереси пов'язані з проблемами використання високотемпературної надпровідності в електричних пристроях.

*Надійшла до редколегії 14.02.2012
Рецензент д.т.н., проф. Луников В.С.*