

НАМАГНИЧИВАНИЕ МОНОДОМЕННЫХ ВТСП ЭЛЕМЕНТОВ

Л.К. Ковалев¹, С.М.-А. Конеев¹, А.Е. Ларионов¹, И.И. Акимов², В. Гавалек³

¹⁾ *Московский Авиационный Институт (МАИ), Москва, Россия*

²⁾ *Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Неорганических Материалов им. А.А. Бочвара (ВНИИНМ), Москва, Россия*

³⁾ *Institut für Physikalische Hochtechnologie (IPHT), Jena, Germany*

В последнее время появилась реальная возможность создания криомагнитов с высокими значениями «вмороженных» магнитных полей порядка 2 – 4 Тл при температуре жидкого азота и 12 – 15 Тл при температуре жидкого гелия [1–3]. В качестве активных ВТСП элементов для криомагнитов могут использоваться, например, иттриевые керамики (YBCO), а также керамики на основе неодима (NBCO), которые могут быть получены с использованием современных технологий в виде монокристаллов. Высокие значения индукции захваченных магнитных полей в объемных ВТСП элементах делают привлекательным их использование в новых типах криогенных электрических машин повышенной мощности (0,5 – 10 МВт).

ВТСП криомагнит представляет собой индуктор с намагничивающей обмоткой, внутри которой располагаются объемные цилиндрические или плоские ВТСП элементы (рис.1).

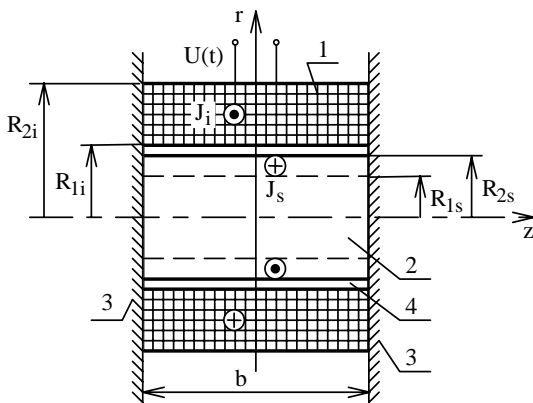


Рис.1. Конструктивная схема криомагнита (1–обмотка индуктора, 2–ВТСП элемент, 3–магнитопровод, 4 – конструктивный зазор)

Возможны два режима намагничивания объемного ВТСП элемента: захлаживание в постоянном магнитном поле и импульсное возбуждение магнитного поля в захлаженном ВТСП элементе. Для электрических ВТСП машин наиболее рациональным является второй режим генерации магнитного поля в криомагните, так как длительность однопо-

лярного импульса тока, определяемая постоянной времени катушки индуктора, и, следовательно, уровень потерь в криомагните в этом случае могут быть очень малыми.

На основе решения уравнений Максвелла получены аналитические соотношения для расчета распределений электромагнитных, токовых и температурных полей при импульсном намагничивании ВТСП элемента с учетом особенностей работы в активной зоне электрической машины. Определена также зависимость границы проникновения поля в ВТСП элемент от геометрии индуктора и отношения плотностей тока в индукторе и ВТСП элементе. Используя эти распределения, на основе закона сохранения энергии

$$\int_V (\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}) dV + \int_V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} + \frac{D^2}{2 \cdot \varepsilon} \right) dV = - \oint_S [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] d\mathbf{S} \cdot$$

получены аналоги уравнений Кирхгоффа для криомагнита на прямой и обратной ветвях намагничивания, определяющие связь напряжения источника питания с магнитным полем индуктора. Здесь $\oint_S [\mathbf{E} \times \mathbf{H}] d\mathbf{S} = UI_k$ – подводимая

мощность к криомагниту;

$\int_V (\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}) dV = R_k I_k^2 + Q_{зучт}$ – активная мощность, выделяемая в криомагните и состоящая из омических потерь в индукторе ($R_k I_k^2$) и гистерезисных потерь в ВТСП элементе ($Q_{зучт}$);

$\int_V \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{B^2}{2 \mu_0} + \frac{D^2}{2 \varepsilon} \right) dV$ – реактивная мощность, связанная с изменением магнитной и электрической энергии криомагнита.

На рис. 2 показаны результаты численного расчета зависимостей от времени ряда параметров криомагнита с ВТСП цилиндром диаметром 28 мм, длиной 60 мм, плотностью критического тока ВТСП керамики $J_s = 85 \text{ А/мм}^2$ при запитке обмотки индуктора от источника постоянного напряжения. Представлены зависимости магнитной индукции B_e , напряжения U , тока I_k , электрических мощности P , энергии Q_k , а также нагрева dT_i обмотки индуктора.

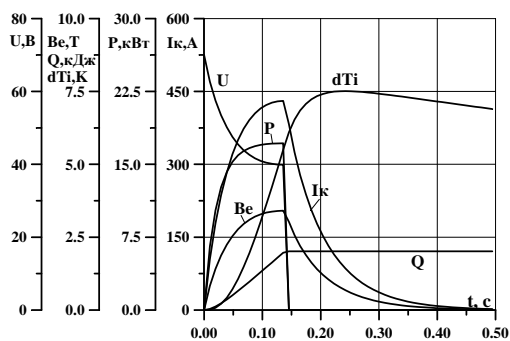


Рис. 2. Временные зависимости параметров криомагнита с цилиндрическим ВТСП элементом

Для экспериментального исследования электромагнитных и тепловых режимов работы ВТСП криомагнита в МАИ создана и экспериментально исследована модель криомагнита (рис.3) с цилиндрическими YBCO элементами диаметром 28 мм и длиной 60 мм, изготовленными в Институте физики высоких технологий (г.Йена, Германия) и ВНИИНМ им.А.А.Бочвара (г.Москва).

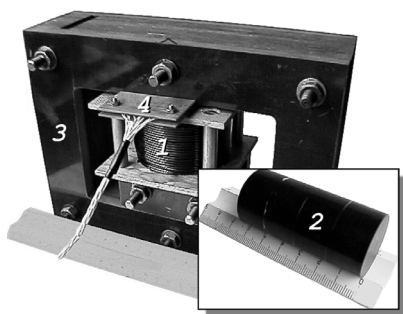


Рис. 3. Модель цилиндрического криомагнита (1 – индуктор; 2 – ВТСП элемент; 3 – магнитопровод; 4 – датчики Холла)

На рис. 4 показаны экспериментальные кривые индукции магнитного поля в четырех характерных точках на поверхности ВТСП образца по радиусу: в центре ($r = 0$ мм) и на расстояниях 4, 8, и 12 мм от него при его намагничивании в экспериментальной установке. Видно, что ВТСП элемент намагничивается за время порядка 0,2 с.

Максимальная величина поля в ВТСП элементе составляет 2,5 Тл на внешнем радиусе образца и 1,75 Тл в центре, максимум захваченного магнитного поля $\sim 1,1 - 1,2$ Тл в центре образца. Эксперименты показали, что при наличии внешнего магнитопровода максимальное магнитное поле на $\sim 35\%$ больше, чем при намагничивании без магнитопровода. Важно отметить, что представленная модель является, по существу, моделью полюса ВТСП электрической машины. Она позволяет в наиболее полной мере моделировать электромагнитные и

тепловые процессы при возбуждении криомагнита на основе объемных ВТСП элементов в условиях их работы в реальной электрической машине.

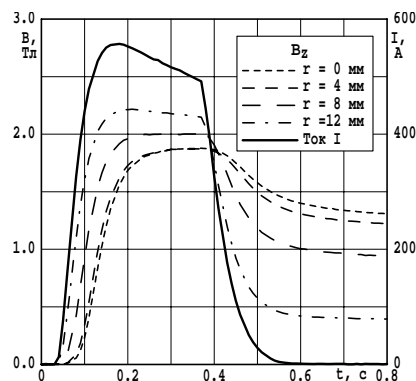


Рис. 4. Процесс намагничивания цилиндрического ВТСП элемента

Расчетные оценки показывают, что электрические машины с использованием криомагнитов на основе объемных ВТСП элементов могут существенно превзойти по массогабаритным показателям соответствующие аналоги традиционного исполнения.

1. Litzkendorf D., Habisreuther T., Zeisberger M., Surzhenko O. and Gawalek W. Preparation of melt-textured YBCO with optimized shape for cryomagnetic application. Applied Superconductivity, 1999, v. 1.
2. Gruss S., Fuchs G., Schätzle P., Krabbes G., Müller K.-H., Fink J. and Schuitz I. Trapped fields 11 T in bulk $\text{Yb}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$ material. Applied Superconductivity, 1999, v. 1.
3. Oka T., Itoh Y., Yanagi Y., Yoshikawa M., Ikuta H., Mizutani U. Construction of 2 – 5 T class superconducting magnetic field generator with use of an Sm123 bulk superconductor and its application to high-magnetic field demanding devices. Superconductivity and its application. Proceeding of the 9-th Japan-US Workshop on High- T_c Superconductors. Yaksugatake Royal Hotel Oizumi-mura, Yamanashi, Japan, October, 13 – 15, 1999.
4. Алиевский Б.Л., Орлов В.Л.. Расчет параметров магнитных полей осесимметричных катушек. Справочник. –М.: Энергоатомиздат, 1983.
5. Тамм И.Е.. Основы теории электричества. –М.: Наука, 1976.