

Расчет процесса перехода в нормальное состояние сверхпроводящих корректирующих магнитов

Л.М. Васильев, В.И. Гридасов, В.В. Зубко, С.С. Козуб, В.А. Сычев
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение.

При работе сверхпроводящих (СП) магнитов ускорителя существует вероятность их перехода в нормальное состояние в результате локального нагрева, причинами которого могут быть, в частности, тепловыделения рассеянного пучка или неисправность криогенной системы. В процессе этого перехода возможно повреждение обмотки магнита вследствие перегрева или электрического пробоя. Данная работа посвящена определению основных параметров СП корректирующих магнитов УНК при переходе в нормальное состояние.

Анализ процесса перехода в одиночном магните

Дипольный, квадрупольный, секступольный СП-корректоры УНК спроектированы по типу “суперферрик”. В табл.1 представлены основные характеристики этих магнитов.

Таблица 1:

| Тип СП-корректора | Диполь | Квадруполь | Секступоль |
|----------------------------------|-----------------|--------------|---------------|
| Расчетная оптическая сила | 0.692 Тл/м | 5.85 Тл | 600 Тл/м |
| Поле на радиусе апертуры, Тл | 1.06 | 0.41 | 0.62 |
| Число катушек в обмотке | 2 | 4 | 6 |
| Сечение катушки, мм ² | 6.8 × 40 | 3.2 × 22.4 | 5.6 × 12.4 |
| Число витков в катушке | 17 × 100 = 1700 | 8 × 56 = 448 | 14 × 31 = 434 |
| Длина прямолинейной части, мм | 650 | 500 | 600 |
| Индуктивность, Гн | 10 | 0.34 | 1.2 |

В качестве токонесущего элемента корректоров использован композитный провод диаметром 0,3 мм, изготовленный из сверхпроводящего сплава НТ-50 в медной матрице (коэффициент заполнения сверхпроводником 0,4) и имеющий критический ток в поле 5 Тл при температуре 4,2 К не менее 50 А.

Для оценки величины параметров, характеризующих процесс перехода СП-обмотки в нормальное состояние, рассмотрим случай, когда каждая обмотка запитывается от индивидуального источника (сопротивлением подводящих проводов пренебрегаем). После возникновения в СП-обмотке нормальной зоны (НЗ) в корректоре появляется активное сопротивление, которое, увеличиваясь, вызывает рост напряжения на источнике тока. После того, как напряжение достигает максимального значения для источника, срабатывает система защиты, которая отключает источник тока, и вся запасенная энергия выделяется в магните. Для определения скорости распространения НЗ воспользуемся адиабатной моделью [1].

Расчет температуры обмотки в процессе перехода проводился численным методом. Приращение температуры ΔT в слое за временный шаг Δt определялось из

выражения $C(T)\Delta T = j^2\rho(T)\Delta t$. Теплоемкость обмотки и удельное электрическое сопротивление провода ρ аппроксимировались с помощью полиномов, а электрическое сопротивление НЗ определялось по формуле $R_{нз} = \sum \rho(T)\Delta V/S^2$, где ΔV — приращение объема НЗ; S — сечение СП-провода. До напряжения на источнике 100 В ток остается номинальным и постоянным, далее за один временной шаг ток в магните уменьшается на величину $\Delta I = I \times R_{нз}/L$, где L — индуктивность обмотки. Результаты расчета переходных параметров СП-корректоров при номинальном токе 20 А представлены в табл.2.

Таблица 2:

| Тип СП-корректора | Секступоль | Квадруполь | Диполь |
|--|------------|------------|--------|
| Запасенная энергия, Дж | 240 | 68 | 2000 |
| Время падения тока до 7 А, с | 0.19 | 0.20 | 0.42 |
| Сопротив. обмотки в конце перехода, Ом | 30 | 11 | 125 |
| Максимальная температура, К | 90 | 70 | 135 |
| Максимальное напряжение в обмотке, В | 180 | 110 | 900 |

Расчет показал, что время достижения напряжения 100 В на источнике тока одинаково для всех обмоток и равно 0,09 с, при этом температура максимально нагретой точки обмоток достигает 50 К. В процессе перехода наибольший нагрев наблюдается в дипольном корректоре, однако он не представляет опасности для СП-обмотки, так как температура ее максимально нагретой точки не превышает 135 К. Электрическое напряжение в обмотке при переходе меньше 1 кВ.

Переход в нормальное состояние группы СП-корректоров

По условиям работы питание каждого СП-дипольного корректора обеспечивается от индивидуального источника питания. Квадрупольные и секступольные СП-корректоры наиболее рационально запитывать последовательно по 10 квадрупольей и по 6 секступолей. Однако при групповом питании СП-корректоров в случае перехода одной из обмоток в нормальное состояние в ней выделится энергия остальных обмоток, что накладывает ограничение на количество магнитов в группе.

На рис.1 показана температура максимально нагретой точки секступольной и квадрупольной СП-обмоток при токе 20 А в зависимости от количества соединенных последовательно магнитов. Видно, что при последовательном соединении 6 секступольных или 10 квадрупольных корректоров температура максимально нагретой точки СП-обмотки, перешедшей в нормальное состояние, не превысит 140 К. Переходные параметры для этого случая представлены в табл.3.

Таблица 3:

| Тип СП-корректора | Секступоль | Квадруполь |
|--|------------|------------|
| Число магнитов в группе | 6 | 10 |
| Запасенная энергия, Дж | 1440 | 680 |
| Время падения тока до 7 А, с | 0.36 | 0.35 |
| Сопротивление обмотки в конце перехода, Ом | 90 | 50 |
| Максимальная температура обмотки, К | 140 | 140 |
| Максимальное напряжение в обмотке, В | 700 | 400 |

Из представленных в табл.2 и 3 результатов видно, что переход корректоров в нормальное состояние при номинальном токе не вызывает повреждения их СП-обмоток. Это позволяет сделать простую систему защиты СП-корректора, которая отключает его источник питания при достижении на нем максимального напряжения. Однако при токах ниже номинального скорость НЗ уменьшается, что увеличивает время роста напряжения на источнике до максимального значения. Это вызывает рост тепловыделений в обмотке до момента отключения питания.

На рис.2 показаны количество тепла, выделяемое в корректорах при переходе, и запасенная в обмотках энергия. Разность между ними составляет тепло, выделяемое в магните до отключения питания. Из этого рисунка видно, что в корректорах при уменьшении тока наблюдается рост тепловыделений до момента отключения питания. Однако количество тепла, выделяемого в обмотках при переходе, в этом случае будет меньше, чем при номинальном токе.

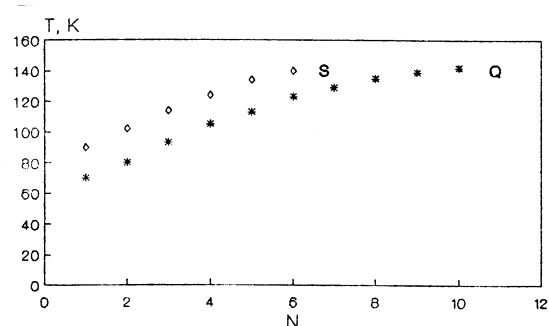


Рис. 1: Температура максимально нагретой точки в процессе перехода квадрупольной Q и секступольной S обмоток при токе 20 А в зависимости от количества соединенных последовательно СП-корректоров.

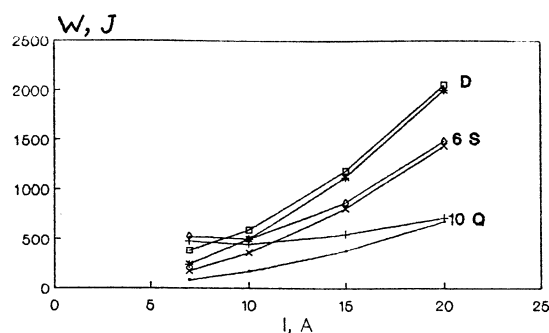


Рис. 2: Количество тепла, выделяемое при переходе в дипольном D, десяти квадрупольных 10Q и шести секступольных 6S корректорах, (верхняя кривая) и запасенная в обмотках энергия (нижняя кривая) в зависимости от тока магнита.

Нагрев гелия в процессе перехода в нормальное состояние

Значительный нагрев гелия при проходе через перешедший в нормальное состояние корректор может вызвать переход в расположенных за ним СП-магнитах. Проведем оценку разогрева гелия при переходе в нормальное состояние дипольного корректора, обладающего наибольшей запасенной энергией. Температура гелия принята постоянной по сечению канала.

Данную задачу описывают уравнения теплопроводности и энергии

$$(c\rho S)_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] - \alpha P (T - T_G),$$

$$(cG)_G \frac{\partial T_G}{\partial x} + (cG/v)_G \frac{\partial T_G}{\partial t} = \alpha P (T - T_G),$$

где $(c\rho S)_0$, T , λ — теплоемкость, плотность, сечение, температура, теплопроводность обмотки соответственно; α — коэффициент теплопередачи; P — периметр теплообмена; $(cG)_G$, T_G , v — теплоемкость, расход, температура, скорость гелия соответственно; t — время.

Данная задача решалась численно. При токе 20 А усредненная по объему температура перешедшей в нормальное состояние части обмотки в адиабатном приближении равна 50 К. Расчет показал, что при расходе гелия 40 г/с максимальный разогрев гелия на выходе из дипольного корректора наблюдается через 5 с и составит 0,5 К. Такой рост температуры гелия не вызовет перехода в нормальное состояние в СП-обмотках остальных корректоров, находящихся в этом криостате, так как их температурный запас 3 К.

На входе в следующий за корректорами основной СП-магнит нагретый гелий смешивается с таким же количеством ненагретого гелия из обводного потока. С учетом этого температура гелия на входе в следующий магнит возрастет на 0,25 К. Это не вызовет переход в нормальное состояние расположенных за корректором СП-магнитов, так как минимальная величина температурного запаса в них составляет 0,7 К [2]. При радиационном облучении возможен переход в нормальное состояние всех установленных в криостате СП-корректирующих обмоток. В этом случае нагрев гелия в криостате увеличивается до 1 К. Однако это не имеет значения, так как из-за радиационного облучения установленные рядом основные магниты еще раньше перейдут в нормальное состояние.

Заключение.

Из проведенных расчетов следует, что если при возникновении нормальной зоны в обмотке СП-корректора и достижении максимального напряжения на источнике тока отключить источник и закортить его выход, то максимальная температура обмотки не превысит 150 К, а электрическое напряжение в ней будет меньше 1 кВ. При этом нагрев охлаждающего потока гелия составит всего 0,25 К. Система защиты СП-корректоров может быть основана на отслеживании напряжения на источнике питания. Для идентификации перешедшего в нормальное состояние корректора при групповом их питании достаточно постоянно регистрировать напряжение на каждом магните.

Список литературы

- [1] Уилсон М. Сверхпроводящие магниты. — М.: Мир. 1985, с.246.
- [2] V.I.Balbekov et al. // IEEE Trans. on magn. 1994. V 30, № 4, p.2669.