

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P8-84-547

С.Л.Зайцев, Л.В.Петрова, Г.П.Решетников, И.П.Юдин

ВЛИЯНИЕ ОГРАНИЧЕННОЙ НОРМАЛЬНОЙ ЗОНЫ
НА ПРЕДЕЛЬНЫЙ ТОК
СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО КАБЕЛЯ
И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛЯ
В АПЕРТУРЕ ДИПОЛЬНОГО МАГНИТА

1984

1. В^{1/} обсуждались физические предпосылки эффекта радиационного возмущения ведущего магнитного поля сверхпроводящего синхротрона и возможное влияние такого возмущения на динамику частиц в процессе ускорения. Обнаруженный эффект обстоятельно изучался в^{2-4/} и вызвал оживленную дискуссию специалистов на совещаниях и конференциях^{5,6/}. В частности, высказывалось предположение о том, что образование ограниченной нормальной зоны /ОНЗ/ в транспонированном сверхпроводящем кабеле скорее приведет к потере его токонесущей способности и переходу магнитов в нормальное состояние, чем к перераспределению плотности транспортного тока $I_{Тр}$ по сечению кабеля и изменению неоднородности магнитного поля в апертуре.

Цель настоящей работы - оценить экспериментально влияние размеров искусственно созданной ОНЗ в СП-кабеле на его токонесущую способность и расчетным путем - на характеристики магнитного поля в апертуре диполя типа "Оконная рама"^{7/}.

2. Из плоского /сечением $\sim 1 \times 4$ мм²/ транспонированного /шаг 22 мм/ сверхпроводящего кабеля, содержащего 15 проводников, каждый из которых состоит из 10⁴ Nb-50% Ti нитей в медной матрице /коэффициент заполнения 0,47/, были изготовлены образцы, содержащие тщательно впаянные медные вставки, замещающие участки СП-проводников /рис.1/.

Геометрические характеристики исследованных образцов приведены в таблице.

Толщина медных вставок, заделанных в СП-кабель, как показано на рис.1, соответствовала толщине кабеля / ~ 1 мм/.

Вольт-амперные характеристики исследуемых образцов СП-кабеля измерялись методом низкоомного шунта^{8/}. На рис.2 схематически показано закрепление двух образцов СП-кабеля со вставками на одной из половин шунта и блок-схема измерений. Четыре образца кабеля /ОК/ закреплялись в пазы глубиной 4 мм, симметрично расположенные относительно плоскости разреза /и плоскости рисунка/ половин медного цилиндрического измерительного шунта /ИШ/. При заделке в пазы шунта образцы кабеля заливались припоем для

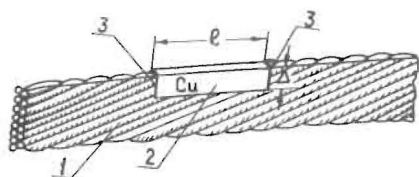


Рис.1. Общий вид исследованных образцов СП-кабеля: 1 - СП-кабель; 2 - медная вставка; 3 - припой. Размеры Δ и ℓ указаны в таблице.

Таблица 1

Образцы СП-кабеля №№ пп	Размеры медной вставки		Число ненарушенных СП-проводников в кабеле
	l , мм	Δ , мм	
1	0	0	15
2	11	0,5	6
3	11	1,0	4
4	11	1,5	0

исключения какого-либо перемещения в магнитном поле при пропускании тока $I_{\text{ТР}}$ через них. Половины шунта, изолированные до места их сочленения стеклотекстолитовой пластиной, в нижней части стягивались между собой винтами, а в верхней присоединялись к тоководам. Место соединения половин шунта заливалось припоем для уменьшения контактного сопротивления.

Измерительный шунт с образцами кабеля помещался в вертикальный гелиевый криостат /К/ с встроенным сверхпроводящим соленоидом /С/ высотой 345 мм и внутренним диаметром 40 мм. В криостате $T_0 = 4,2$ К контролировались уровень и давление жидкого гелия. Поле в соленоиде в диапазоне $0,5 \div 5,3$ Т было достаточно однородным, т.е. на расстоянии 100 мм по оси ("z") от центра /"0"/ изменялось менее чем на 1%. Шунт с помощью штока мог перемещаться вдоль вертикальной оси соленоида "z" так, чтобы горизонтальные участки образцов с медными вставками /место их расположения обозначено МВ/ находились в центре соленоида. Суммарная длина трех горизонтальных участков СП-кабеля, расположенных в поперечном магнитном поле /В/, составляла около 100 мм. Первоначально измерения проводились с образцами в верхней части шунта, имеющими заведомо меньшие предельные токи. Затем шунт поднимался и устанавливался в положение, при котором проводились измерения с нижними образцами СП-кабеля. Вольт-амперные характеристики исследуемых образцов измерялись при фиксированном значении индукции магнитного поля /В/ соленоида. В измерительный шунт от источника тока /ИТ/ вводился ток $I_{\text{ТР}}$, величина которого определялась по напряжению на токовом шунте /ТШ/ и была пропорциональна горизонтальному /по оси "x"/ смещению перьев самописцев /С1 и С2/, регистрирующих потенциалы /оси "y"/ на соответствующих потенциальных парах шунта. Эта процедура повторялась с некоторыми интервалами для каждого образца несколько раз. Таким образом были получены вольт-амперные характеристики нескольких аналогичных образцов.

3. На рис.3 показаны измеренные вольт-амперные характеристики образцов СП-кабеля /№1 и №3 в таблице/. Величина тока I , соответ-

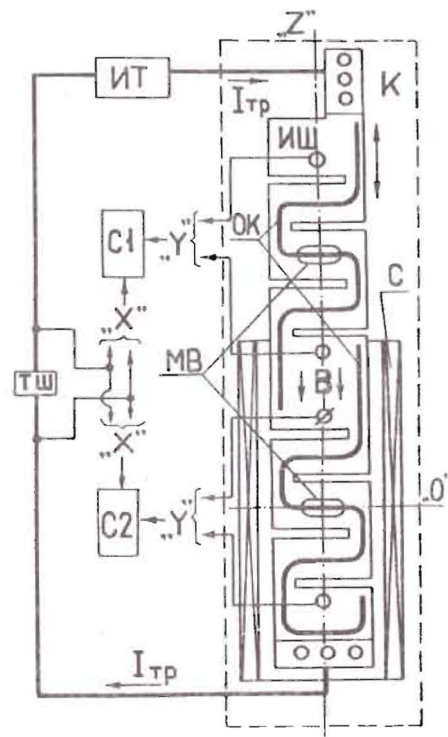
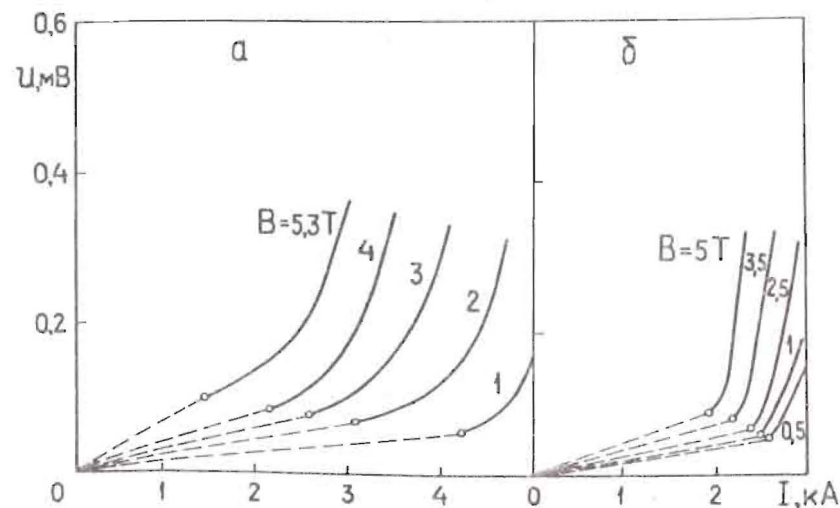


Рис.2. Расположение образцов СП-кабеля на измерительном шунте и блок-схема измерений /обозначения в тексте/.

Рис.3. Вольт-амперные характеристики СП-кабеля в магнитном поле соленоида; а - кабель без медной вставки; б - кабель с медной вставкой 1x11 мм.



ствующая отклонению напряжения на ~ 10 мкВ от прямолинейного участка, принималась нами за предельный ток I_C для всех образцов кабеля. Погрешность определения I_C составляла 10%.

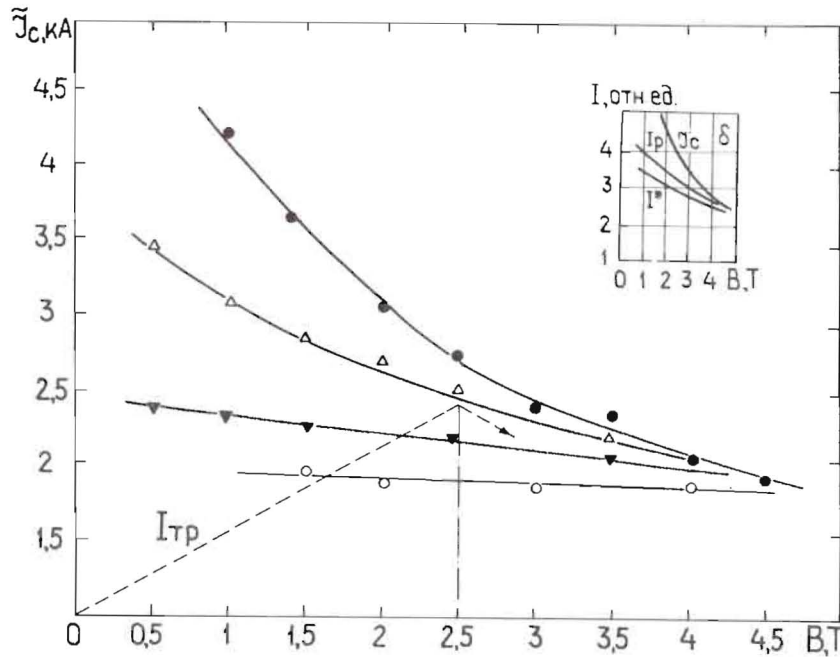


Рис.4. Измеренные зависимости предельного тока от внешнего магнитного поля для образцов СП-кабеля №№1 - ●, 2 - Δ, 3 - ▲ и 4 - ○; δ - расчетная оценка для J_C , I_p и I^* в том же кабеле.

Полученное изменение предельного тока в зависимости от индукции магнитного поля /рис.4/ близко к аналогичной зависимости критического тока кабеля $J_C(B)$ только для образца №1 /без вставки/. Искусственно введенная ОНЗ /вставка/ нарушает тепловой баланс образцов, и, следовательно, резистивная зона может изменять свои размеры /в данных измерениях отсутствовал контроль изотермичности образцов/. Поэтому \bar{J}_C для образцов №2 и №3 интерпретируется нами как минимальный ток распространения нормальной зоны I_p в ненарушенных сверхпроводниках. В том случае, когда вставка перерезает все сверхпроводники в кабеле, в условиях интенсивного теплообмена предельный ток \bar{J}_C , по-видимому, соответствует I^* - максимальному току равновесия нормальной зоны.

Изложенная выше интерпретация результатов измерений \bar{J}_C соответствует физическим представлениям /9/ о поведении J_C , I_p и I^* , в зависимости от величины индукции внешнего магнитного поля B , проиллюстрированным в верхней части рис.4. Практически, при соответствующих условиях /интенсивный теплообмен и т.п./ уменьшение J_C с ростом Δ до определенных пределов, может не сказываться

ся на величине I_{tr} в СП-магните как, например, для образца №2 и зависимости $I_{tr}^{1/2}$, показанной на рисунке пунктирной линией.

4. В расчетах характеристик поля в апертуре магнита предполагалось, что в пределах ОНЗ с размером Δ не течет I_{tr} , что является достаточно хорошим приближением, если сравнить удельное сопротивление нормальной зоны и сверхпроводящей части кабеля при температуре жидкого гелия. На рис.5 показана геометрия поперечного сечения магнита, для которой были проведены расчеты, и приведены результаты этих расчетов. Величина Δ постоянна по всей длине витка, соответствующего длине диполя /7/, т.е. $l_{эфф} = l_{магн} = 43$ см.

В двумерном приближении компоненты магнитного поля представлялись в виде:

$$\frac{1}{l_{эфф}} \int_{-\infty}^{\infty} B_y(r, \theta) dz = \sum_{n=1}^{N_r} \left(\frac{r}{R_a}\right)^{n-1} [c_n \cos(n-1)\theta - d_n \sin(n-1)\theta], \quad /1/$$

$$\frac{1}{l_{эфф}} \int_{-\infty}^{\infty} B_x(r, \theta) dz = \sum_{n=1}^{N_r} \left(\frac{r}{R_a}\right)^{n-1} [c_n \sin(n-1)\theta + d_n \cos(n-1)\theta],$$

где n - номер гармоники магнитного поля; $N_r = 21$ - максимальный номер учитываемых гармоник поля при шаге по углу $\Delta\theta = 9^\circ$; d_n и c_n - амплитуды гармоник с номером n на радиусе R_a ; $R_a = 2,5$ см - радиус апертury, на котором проводится гармонический анализ /максимальный размер апертury $R_{max} = 2,75$ см/; r и θ - полярные координаты; ось z совмещена с осью магнита; $c_1 = B_0$ - дипольная составляющая магнитного поля в центре магнита /и, соответственно, в центре системы координат/; $B_0 = 1,028 \cdot I_{tr}$ - для геометрии, приведенной на рис.5. /размерности $B_0 - [T]$, а $I - [kA]$ /. Амплитуды c_n и d_n связаны соотношением $b_n^2 = c_n^2 + d_n^2$.

Вычисление амплитуд c_n и d_n проводилось по формулам Бесселя /10/, что требовало знания компонент магнитного поля, которые рассчитывались с помощью программы MIC2 /11/, по методике, описанной в /7/:

$$\frac{1}{l_{эфф}} \int_{-\infty}^{\infty} B_y(x, y, z) dz = \sum_{i=1}^M \sum_{n=-N_x}^{N_x} \sum_{m=-N_y}^{N_y} I_i \cdot G_{y,i}(x-x_{n,i}, y-y_{m,i}, a_i, b_i, \mu), \quad /2/$$

$$\frac{1}{l_{эфф}} \int_{-\infty}^{\infty} B_x(x, y, z) dz = \sum_{i=1}^M \sum_{n=-N_x}^{N_x} \sum_{m=-N_y}^{N_y} I_i \cdot G_{x,i}(x-x_{n,i}, y-y_{m,i}, a_i, b_i, \mu),$$

где i - номер витка с током I_i ; M - количество витков; μ - магнитная проницаемость; $x_{0,i}$ и $y_{0,i}$ - координаты центра i -го витка; a_i и b_i - полуширина и полувысота i -го витка; $N_x = N_y = 16$;

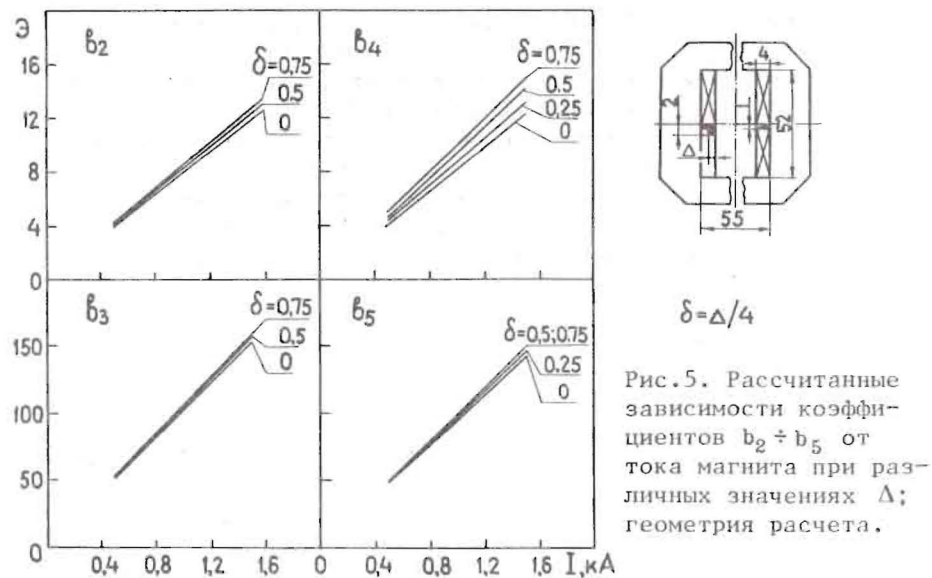


Рис.5. Рассчитанные зависимости коэффициентов $b_2 \div b_5$ от тока магнита при различных значениях Δ ; геометрия расчета.

$G_{x,i}$ и $G_{y,i}$ - геометрические факторы, возникающие при вычислении магнитного поля по закону Био-Савара-Лапласа и подробно определяемые в работе /7/.

При проведении двумерных расчетов предполагалось, что при появлении в обмотке непроводящей зоны шириной Δ , величина тока в сверхпроводящей зоне обмотки остается прежней, но при этом соответственно увеличивается его плотность, а именно на величину $1/(1-\delta)$, т.к. плотность тока обратно пропорциональна ширине СП-зоны i -го витка, равной $2 \cdot a_i$. При возникновении непроводящей зоны ширина проводящей зоны уменьшается до $2a_i = 2 \cdot a_{0,i} \cdot (1-\delta)$. Здесь $\delta = 0 \div 1$ - относительная ширина непроводящей зоны в СП-витке; а $2 \cdot a_{0,i}$ - полная геометрическая ширина СП-витка.

Сравнение данных расчета /рис.5/ с измерениями, выполненными ранее в работе /2/, результаты которых приведены на рис.6, показывает различие в величинах амплитуд гармоник, связанное, в частности, с тем, что расчеты выполнены в двумерной геометрии. Тем не менее следует отметить, что результаты как расчетов, так и измерений показывают более сильную чувствительность к ширине нормальной зоны четных гармоник, чем нечетных. Наблюдается также соответствие полученных в измерениях /2/, и рассчитанных в настоящей работе направлений изменения амплитуд гармоник при появлении ОНЗ в СП-кабеле обмотки. И то и другое связано с тем, что расположение непроводящей зоны по сечению магнита /рис.5/ в расчетах было выбрано в соответствии с расположением нагревателя в выполненных ранее измерениях на СП-диполе.

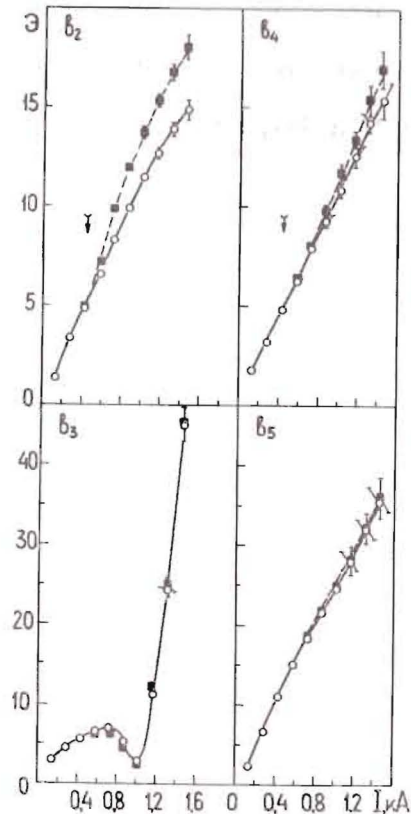


Рис.6. Зависимости амплитуд гармоник поля $b_2 \div b_5$ в апертуре от тока магнита, измеренные в работе /2/ без нагревателя и при включенном нагревателе.

5. Проведенные расчеты подтверждают гипотезу /1,2/ о связи изменений неоднородности магнитного поля в апертуре СП-диполя с перераспределением плотности I_{TP} по сечению кабеля, вызываемым появлением в нем ОНЗ.

Проведены измерения предельных токов СП-образцов с искусственным нарушением проводников, имитирующим ОНЗ. Результаты измерений подтверждают возможность сохранения в значительной мере, при определенных условиях, токонесущей способности СП-кабеля при появлении в нем по каким-либо причинам ограниченной нормальной зоны.

Авторы благодарны за поддержку, обсуждение работы и ценные замечания И.А.Шелаеву, Л.Н.Зайцеву, И.С.Хухаревой и П.Василеву, а также Б.Д.Зельдичу и В.В.Пискалеву за помощь при проведении измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Василев П.Г. и др. ОИЯИ, Р9-82-496, Дубна, 1982.
2. Василев П.Г. и др. ОИЯИ, Р9-83-394, Дубна, 1983.
3. Василев П.Г. и др. ОИЯИ, Р9-83-787, Дубна, 1983.
4. Василев П.Г. и др. ОИЯИ, Р9-83-777, Дубна, 1983.
5. Василев П.Г. и др. В кн.: Труды VIII Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 19-21 октября, 1982. Изд. ОИЯИ, Дубна, 1983, т. 1, с. 281.
6. Vassilev P.G. et al. Journal de Physique Coll. 1984, S1, N1, p. 45.
7. Шелаев И.А., Юдин И.П. ОИЯИ, Р9-80-333, Дубна, 1980.
8. Сычев В.В. и др. "Известия АН СССР. Энергетика и транспорт", 1972, №4, с. 88.

9. Альтов В.А. и др. Стабилизация сверхпроводящих магнитных систем. "Энергия", М., 1975.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. "Наука", М., 1970, с. 597.
11. Жидков Е.П. и др. ОИЯИ, Р9-81-12, Дубна, 1981,

Рукопись поступила в издательский отдел
27 июля 1984 года.

Зайцев С.Л. и др.

P8-84-547

Влияние ограниченной нормальной зоны на предельный ток сверхпроводящего кабеля и распределение поля в апертуре дипольного магнита

В образцах сверхпроводящего /СП/ кабеля с искусственно созданной ограниченной нормальной зоной /ОНЗ/ в виде медных вставок в СП-кабель, измерены величины предельного тока в поперечных магнитных полях величиной $0,5 \div 5,3$ Т. Для аналогичных ОНЗ, вызывающих перераспределение плотности тока в сечении кабеля, рассчитаны в двумерном приближении амплитуды гармоник магнитного поля в апертуре СП-диполя. Наблюдается качественное согласие поведения амплитуд гармоник, в зависимости от глубины проникновения ОНЗ в СП-кабель, с результатами ранее выполненных измерений при подкритичном импульсном нагреве.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергия ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1984

Перевод Л.Н.Барабаш

Zaitsev S.L. et al.

P8-84-547

Influence of a Restricted Normal Zone on the Limiting Current of a Superconducting Cable and Field Distribution in the Aperture of a Dipole Magnet

The values of limiting current in transverse magnetic fields of 0.5-5.3 T have been measured for samples of a superconducting (SC) cable with a specially created restricted normal zone (LNZ) in the form of copper insertions. Harmonic amplitudes of the magnetic field in the SC-dipole aperture have been calculated to a two-dimensional approximation for similar LNzs producing the redistribution of current density in the cable section. The behaviour of the harmonic amplitudes are in qualitative agreement with results of measurements previously performed under subcritical pulsed heating as a function of the depth of penetration into LNz in the SC cable.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 1984