

Г-79

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

9 - 12604

ГРЕБЕНЬ

Леонид Иосифович

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ПРОЦЕССОВ
В ПРЕЦИЗИОННЫХ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ИМПУЛЬСНЫХ
МАГНИТАХ
ДЛЯ ПРОТОННЫХ СИНХРОТРОНОВ

05.09.04 - Электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Дубна 1979

Работа выполнена в Радиотехническом институте АН СССР,
Москва.

Научный руководитель:
доктор технических наук,
старший научный сотрудник Евгений Сергеевич
МИРНОВ

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук
профессор Юрий Михайлович
АДО

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник Игорь Николаевич
ГОНЧАРОВ

Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт физики высоких энергий (г.Серпухов)

Автореферат разослан " _____ " 1979 г.

Защита диссертации состоится " _____ " 1979 г.
в " _____ " час. на заседании Специализированного совета
Д-047.01.02 при Лаборатории высоких энергий Объединенного инсти-
тута ядерных исследований, г.Дубна, Московской области, лабора-
тория высоких энергий ОИЯИ, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЛВЭ ОИЯИ.

Ученый секретарь
Специализированного совета *М.Ф.Лихачев* М.Ф.Лихачев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из наиболее перспективных направлений развития ускорительной техники является в настоящее время создание ускорителей, накопительных колец и ускорительно-накопительных комплексов на сверхвысокие энергии с применением сверхпроводящих (СП) магнитных систем. За счет повышения магнитной индукции до 4-5 Т и более такие магнитные системы позволяют значительно увеличить предельную энергию ускоренных частиц без чрезмерного роста размеров и стоимости ускорителя или уменьшить его размеры при заданной энергии частиц. Другим важным преимуществом СП магнитов является уменьшение потерь энергии в обмотках в импульсном режиме и практически полное отсутствие потерь в стационарном режиме, что существенно снижает эксплуатационные расходы. За последние годы научные исследования и работы по созданию СП магнитных систем для ускорителей и экспериментальной физики высоких энергий широко развернулись в ведущих ускорительных центрах всего мира и представляют собой одно из наиболее продвинутых и быстро развивающихся направлений прикладной сверхпроводимости.

Специфика применения явления сверхпроводимости в ускорительной технике требует подробного исследования и решения ряда научно-технических и технологических проблем.

Целью работы является теоретическое, расчетное, а также частично и экспериментальное исследование следующих вопросов, решение которых необходимо для создания СП магнитов, удовлетворяющих требованиям ускорительной техники:

- 1) определение гистерезисных потерь энергии в СП жилах в импульсном режиме;
- 2) исследование влияния остаточных полей на распределение индукции дипольных СП магнитов;
- 3) рассмотрение особенностей перехода в нормальное состояние СП обмоток разного типа;

4) формирование однородных полей в безжелезных СП дипольных магнитах ;

5) влияние эффектов насыщения железного экрана на величину и распределение индукции магнита.

Научная новизна работ, вошедших в диссертацию, отмечена в изложении ее содержания.

Практическая ценность работ. Результаты, изложенные в трех первых главах работы, нашли непосредственное применение в разработке и создании СП дипольных магнитов СПД-3 и СПД-3'. Результаты IV главы и всей работы в целом могут быть использованы для создания прототипов СП магнитов для ускорителей, а также в других областях науки и техники, где требуется формирование сильных магнитных полей дипольного типа или импульсных магнитных полей с применением СП обмоток.

Объем работы. Диссертация содержит введение, четыре главы и заключение. Работа изложена на 176 страницах машинописного текста с 53 иллюстрациями и списком цитированной литературы из 67 пунктов. Материалы, вошедшие в диссертацию, были представлены в виде докладов на II, III, IV и V Всесоюзных совещаниях по ускорителям заряженных частиц в 1970-1976 г.г.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

I глава посвящена рассмотрению в рамках модели критического состояния сверхпроводников II рода гистерезисных потерь в СП обмотках и остаточных полей в дипольных магнитах.

Новизна в исследовании потерь заключается в подробном рассмотрении зависимости гистерезисных потерь от амплитуды изменения индукции, поперечного размера СП жил и вида зависимости $j_c(B)$ с учетом процесса проникновения магнитного потока в сверхпроводник

при широком диапазоне изменения индукции. Такой подход соответствует специфике СП импульсных дипольных магнитов для ускорителей, в обмотке которых в каждом цикле изменения тока индукция меняется от минимальных до максимальных значений и где всегда имеются области с неполным проникновением потока в сверхпроводник. Рассмотрены переходный и стационарный циклы намагничивания СП образца. В последнем случае потери за счет гистерезисного характера проникновения магнитного потока на единицу объема сверхпроводника имеют вид $W = \frac{B_0^4}{4\mu_0^2 \alpha a} F_1(B/B_0)$

при $B \leq B_2 = -B_0 + \sqrt{B_0^2 + 4\mu_0 \alpha a}$, где $F_1(\epsilon) = 3/16 + \epsilon/4 + \epsilon^2/8 + \frac{3}{16}(1+\epsilon)^4 + \frac{1+\epsilon}{8\sqrt{2}} \sqrt{1+(1+\epsilon)^2} - \frac{1+\epsilon}{4\sqrt{2}} [1+(1+\epsilon)^2]^{3/2} + \frac{1}{2\sqrt{2}} \ln \frac{1+\epsilon + \sqrt{1+(1+\epsilon)^2}}{1+\sqrt{2}}$,
и $W = \frac{B_0^4}{4\mu_0^2 \alpha a} [F_1(B_2/B_0) + F_2(\xi, k)]$ при $B > B_2$, где $F_2(\xi, k) = \frac{\xi^4 - (1+4k)\xi^2 - k\xi^2 - 1 - 4k}{4} - \frac{\xi(\xi^2 - 1 - 4k)}{2} - \frac{\xi(\xi^2 - 2k)^{3/2}}{4} - \frac{k}{4} [\xi \sqrt{\xi^2 - 2k} - 2k \ln \frac{\xi + \sqrt{\xi^2 - 2k}}{\sqrt{1+2k} + \sqrt{1+4k}}] + \frac{3k+1}{4} \sqrt{(1+2k)(1+4k)}$,
 $\xi = 1 + B/B_0$, $k = \mu_0 \alpha a / B_0^2$, α и B_0 - параметры в формуле $j_c = \alpha / (B + B_0)$ для зависимости критической плотности тока от индукции, $2a$ - поперечный размер СП жилы, B - амплитудное значение индукции. Приведенные формулы дают величины гистерезисных потерь при росте индукции от 0 до B при частичном и полном проникновении соответственно. В предельном случае больших индукций и тонких СП жил получается известное выражение $W \sim \ln(1 + B/B_0)$.

Получены также формулы для мощности гистерезисных потерь с учетом транспортного тока. Как видно из результатов численных расчетов, показанных на рис. I, при малых индукциях зависимость может быть аппроксимирована степенной функцией с показателем 3 - 4, при промежуточных B показатель степени постепенно уменьшается, а при больших индукциях функция приближается к логарифмической.

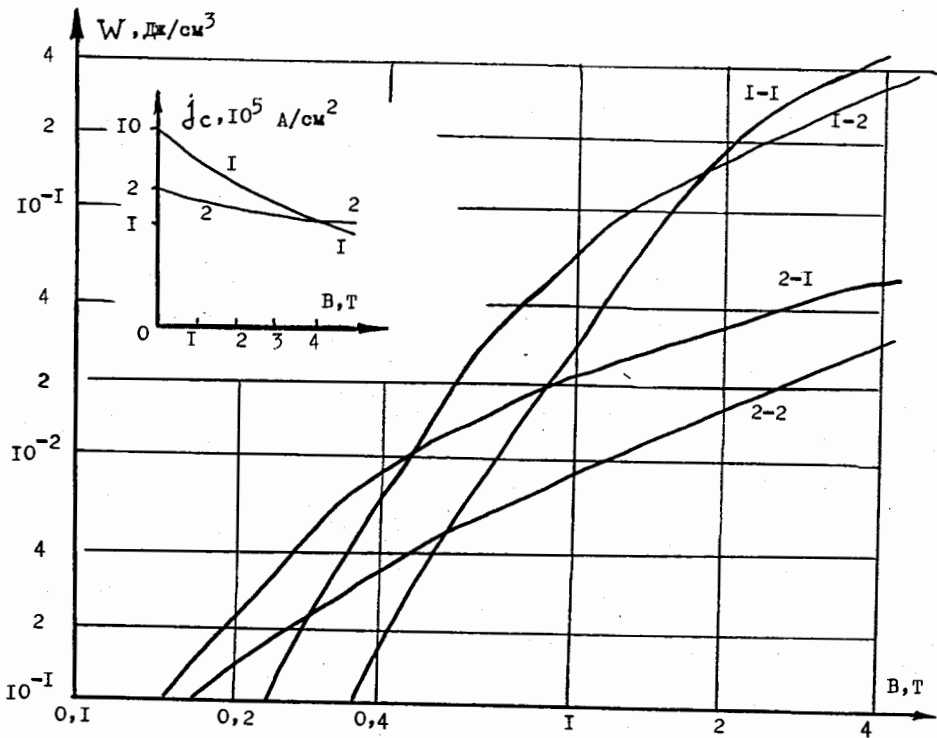


Рис. 1. Зависимости удельных потерь от амплитуды индукции. На вставке показаны принятые для расчетов зависимости критической плотности тока от индукции. I-I и I-2 - $a=125$ мкм, 2-I и 2-2 - $a=10$ мкм.

Непростой характер имеет и зависимость W от a . Кривые I-I и 2-I пересекаются при $B \sim 0,8$ Т, а кривые I-2 и 2-2 при $B \sim 0,3$ Т, т.е. гистерезисные потери в тонких жилах при малых и промежуточных индукциях превышают потери в толстых жилах. Подобное поведение потерь наблюдалось в эксперименте.^{x)} Важную роль играет вид функции $j_c(B)$ при малых B . Чем круче возрастает критическая плотность то-

^{x)} Y. Tanaka et al., Cryogenics, v.17, n.4, p.233, 1977.

ка при $B \rightarrow 0$, тем большими потерями характеризуется сверхпроводник. Потери в комбинированных сверхпроводниках негистерезисного происхождения^{x)} в данной работе не рассмотрены.

Вторая часть главы содержит новые результаты теоретического и экспериментального исследования важного для ускорительных магнитов вопроса о влиянии остаточных полей, связанных с захватом магнитного потока СП жилами, на распределение индукции в апертуре СП диполя при малых токах в обмотке, когда остаточные поля могут в значительной степени ухудшить однородность поля диполя.

После цикла изменения индукции с $B > B_2$ в каждой СП жиле остается пара практически незатухающих противоположно направленных токов, эквивалентных дипольному магнитному моменту. Ориентация этих дипольных моментов определяется направлением магнитной индукции в разных точках СП обмотки, где распределение индукции имеет довольно сложный характер. В результате в апертуре магнита при нулевом токе обмотки возникает сильно неоднородное поле, величина индукции которого имеет вид $B_{ост} = B_1 n a^2 S$, где n - число СП жил в кабеле, $B_1 = -B_0 + \sqrt{B_0^2 + 2\mu_0 \alpha a}$, а S - геометрический фактор, учитывающий конкретный характер распределения индукции в обмотке диполя и относительное положение точки, в которой определяется $B_{ост}$. Численными расчетами было показано, что основной компонентой неоднородности поля в апертуре дипольного СП магнита является секступоль, а суммарная нелинейная добавка к дипольному остаточному полю может достигать 100% на расстоянии от оси магнита, равном 0,7 внутреннего радиуса обмотки.

^{x)} I. Hlasnik, Proc. VI Int. Conf. Mag. Tech., Bratislava, 1977, p.575.

Экспериментально была исследована зависимость $B_{ост}$ от амплитуды индукции в предшествующем цикле магнита, а также были измерены распределения индукции в апертуре магнита при нулевом токе в обмотке и при токе, соответствующем индукции в апертуре $\sim 0,1T$. Результаты, полученные при исследовании остаточных полей магнита СПД-2, показаны на рис. 2 и 3. Характер распределения $B_{ост}$ и величина остаточной индукции в центре апертуры (за вычетом вклада намагничённости деталей из нержавеющей стали) согласуются с результатами расчетов.

Результаты исследования гистерезисных потерь и остаточных полей в СП диполях показывают, что и те и другие могут быть снижены за счет уменьшения диаметра СП жил и выбора сверхпроводника с малым ростом j_c при $B \rightarrow 0$.

II глава посвящена рассмотрению процесса перехода СП обмотки магнита в нормальное состояние. Основная новизна этого раздела заключается в обобщении известных результатов по распространению нормальной зоны в СП кабеле на обмотки разных типов, в особенности на пропитанные компаундом обмотки. Из решения линеаризованных уравнений теплопроводности получено выражение для скорости распространения нормальной зоны вдоль комбинированного токопроводника, зависящей от теплофизических параметров и способа охлаждения перешедшего в нормальное состояние витка. В обмотках с каналами для гелия расчетная скорость распространения фронта нормальной зоны вдоль кабеля составляет десятки-сотни м/с. В компаундированных обмотках численными расчетами с учетом теплопередачи от перешедшего в нормальное состояние витка к соседним и разогрева последних показано, что нормальная зона распространяется, в основном, от инициирующего переход витка к соседним, и про-

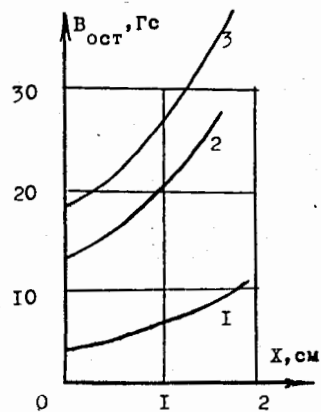


Рис. 2. Распределение остаточной индукции в апертуре СП диполя СПД-2 после циклов с индукцией $I - 0,15 T$, $2 - 1,4 T$, $3 - 3,75 T$.

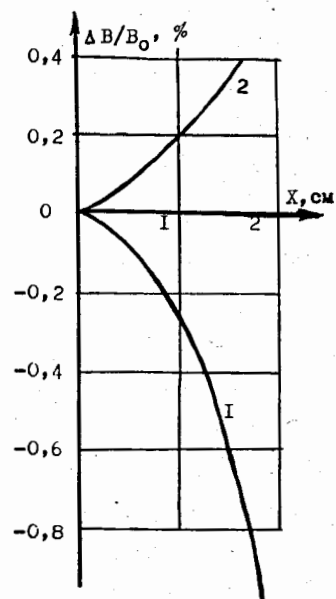


Рис. 3. Влияние остаточных полей на распределение индукции в апертуре СПД-2 при индукции в центре $\sim 0,1 T$: $1 -$ при первом вводе тока в обмотку, $2 -$ после циклов с индукцией $3,75 T$.

процесс приобретает объемный характер. Эффективная скорость распространения нормальной зоны, т.е. отношение длины кабеля в нормальной части обмотки к времени с момента зарождения нормальной фазы, составляет при этом тысячи м/с. За счет этого нормальная зона быстро захватывает значительную часть обмотки без возникновения локального перегрева, что возможно в обмотках с каналами при стабилизации размера нормальной области. Результаты расчета для компаундированной обмотки показаны на рис. 4. Характерное время перехода в нормальное состояние витков, соседних с инициирующим переходом, составляет $\sim 10^{-4}$ с, а время перехода в нормальное состояние всего компаундированного магнита сокращается, по сравнению с магнитом с каналами, более чем в 10 раз. Расчетные скорости и характер распространения нормальной фазы согласуются с проведенными экспериментальными исследованиями процесса перехода.

III глава посвящена вопросам расчета и формирования магнитных полей безжелезных СП дипольных магнитов с высокой однородностью поля в апертуре, соответствующей требованиям ускорительной техники. Жесткие требования по однородности и идентичности полей в СП диполях должны быть реализованы за счет выбора и оптимизации конфигурации обмотки и особо точного ее изготовления.

Новизна этой главы диссертации заключается в разработке и реализации в виде вычислительных программ для ЭВМ методик оптимизации конфигурации многослойной обмотки СП диполя с высокой однородностью поля в апертуре, определения технологических допусков, обеспечивающих требуемые параметры магнитов, расчета трехмерного распределения поля реального магнита конечной длины.

Для оптимизации конфигурации многослойной обмотки СП диполя радиальная и азимутальная компоненты магнитной индукции, создаваемой в апертуре слоем с постоянной плотностью тока j , представлены в виде рядов Фурье

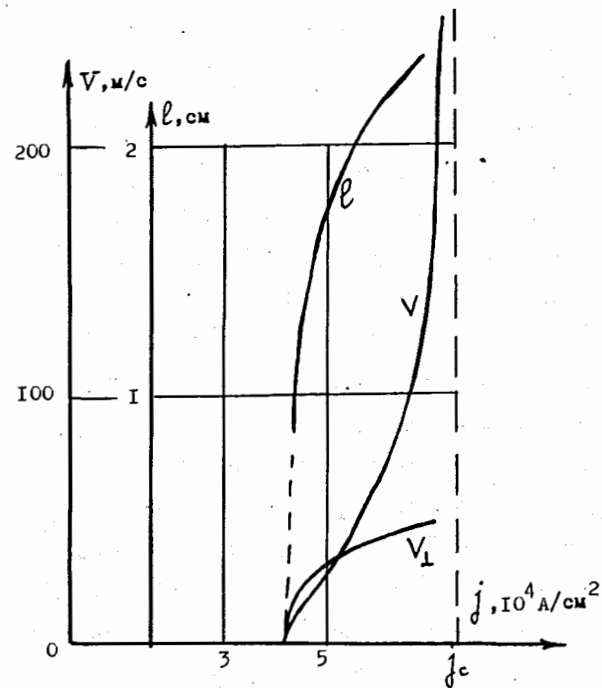


Рис. 4. Распространение нормальной фазы в компаундированной обмотке из СП кабеля марки Niomax FM: V – скорость распространения вдоль кабеля, V_1 – скорость в перпендикулярном направлении от витка к витку, l – путь, пройденный фронтом нормальной зоны вдоль кабеля до перехода в нормальное состояние соседних витков. Индукция в месте перехода равна 7 Т.

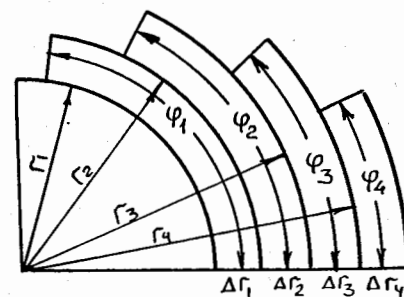


Рис. 5. Поперечное сечение четверти четырехслойного СП безжелезного дипольного магнита с постоянной плотностью тока в слоях.

$$B_z = \sum_n B_n \sin n\varphi, \quad B_\varphi = \sum_n B_n \cos n\varphi,$$

$$\text{где } B_n = 0,8 \frac{j \cdot \tau}{n(n-2)m} \sum_m \sin n\varphi_m \left[(\tau/\tau_m)^{n-2} - (\tau/(\tau_m + \Delta\tau_m))^{n-2} \right],$$

а $n=1,3,5,\dots$, что соответствует дипольной симметрии поля. Идеальной можно считать такую обмотку, у которой $B_3 = B_5 = B_7 = \dots = 0$. В реальной обмотке СП диполя можно говорить об обеспечении подавления 3,5,7,... гармоник поля в апертуре за счет соответствующего выбора угловых протяженностей слоев φ_m (рис.5). В разработанной вычислительной программе осуществлялось подавление гармоник с 3 по 9 включительно. Специальным расчетом было показано, что последующие гармоники не дают существенного вклада в неоднородность поля в рабочей апертуре. Для разработанного дипольного магнита СПД-3 были определены угловые протяженности четырех парных слоев, обеспечивающие однородность поля $\lesssim 10^{-3}$ с учетом реальных поперечных размеров токопроводника прямоугольного сечения, допустимой степени его деформации при укладке витков в обмотку и изменения размеров магнита при охлаждении до гелиевых температур.

Важным вопросом создания СП дипольного магнита с высокой однородностью поля является определение технологических допусков. Для обоснованного выбора допусков было исследовано влияние дефектов изготовления токопроводника и обмотки на величину и распределение поля магнита. Проведенные расчеты позволили выработать технологические допуски, которые должны были обеспечить в пределах апертуры, составляющей 70 % от внутреннего диаметра обмотки, однородность поля не хуже $(5-7) \cdot 10^{-4}$ и идентичность полей магнитов $\sim 10^{-3}$. Разработанные и изготовленные в соответствии с расчетами СП диполи ускорительного типа СПД-3 и СПД-3' имеют, согласно измерениям, однородность поля в среднем сечении в пределах 50 % от внутреннего диаметра обмотки не хуже $3 \cdot 10^{-4}$ и идентичность не хуже 10^{-3} .

Для определения максимального значения индукции в обмотке магнита и оценки влияния конечной длины магнита и реальной формы его торцевых частей на распределение поля в апертуре была составлена вычислительная программа расчета трехмерного распределения поля диполя. Вклады в величину индукции криволинейных частей витков на торцах магнита определялись с помощью криволинейных интегралов численными методами. Максимальное превышение индукции в обмотке СПД-3 по сравнению с индукцией в апертуре составляет, согласно расчетам, 15%. Вклад торцевых частей магнита длиной ~ 1 м в неоднородность поля в среднем сечении меньше, чем вклад дефектов изготовления в пределах установленных допусков. Расчетное распределение индукции вдоль оси магнита согласуется с измерениями. IV глава посвящена методике и результатам расчетов магнитных полей СП диполей с кольцевыми железными экранами с учетом эффектов насыщения ферромагнитного материала экрана.

Методы решения нелинейных задач магнитостатики в дифференциальной или интегральной постановках подробно исследованы рядом авторов. Новизна предложенной в диссертации методики, основанной на методе интегральных уравнений, заключается в изложенном ниже способе определения намагниченности элементов экрана, позволяющем методом последовательных приближений найти самосогласованное распределение магнитного поля в экране и в апертуре без решения систем уравнений большой размерности при обеспечении высокой точности расчетов. При этом для всех элементов разбиения экрана на каждом шаге итерационного процесса определяются точные значения намагниченности с учетом вида функции $\mu(H)$.

Для определения компонент поля в плоском однородно намагниченном элементе экрана требуется решение выведенной нелинейной системы уравнений второго порядка вида

$$\frac{\mu(H)+1}{2} \vec{H} = \vec{H}^{\text{внеш}} + [\mu(H)-1] \hat{C}^{\text{свб}} \vec{H},$$

где $\vec{H}^{\text{внеш}}$ — напряженность внешнего однородного поля, в котором находится элемент, а $\hat{C}^{\text{свб}}$ — матрица, позволяющая учесть геометрические характеристики рассматриваемого намагниченного элемента. Напряженность поля, создаваемого данным элементом в произвольной точке А вне его границ, определяется при этом выражением

$$\vec{H}' = [\mu(H)-1] \hat{C} \vec{H},$$

где матрица \hat{C} зависит от формы элемента и относительного положения точки А. С помощью формул Грина для односвязных и двухсвязных областей соответственно и проведения контурного интегрирования были получены аналитические выражения для компонент матриц \hat{C} и $\hat{C}^{\text{свб}}$ для случая элементов в форме кольцевых секторов. В качестве $\vec{H}^{\text{внеш}}$ на нулевом шаге итерационного процесса было использовано распределение поля обмотки магнита, а на последующих шагах — суперпозиция полей обмотки и всех элементов экрана кроме рассматриваемого.

Работоспособность, точность и эффективность разработанной на основе изложенной методики вычислительной программы были подтверждены расчетами тестового варианта дипольного идеального магнита с кольцевым экраном, для которого известны аналитические решения как для малых, так и для больших полей.

Проведено детальное исследование влияния толщины и положения экрана относительно обмотки, а также вида функции $\mu(H)$ на величину и распределение индукции в апертуре. Часть полученных результатов представлена на рис. 6 и 7. Вклад экранов, расположенных в непосредственной близости от обмотки, в величину индукции в апертуре может достигать 30–35%. Предпочтительнее использование ферромагнетиков с большими значениями намагниченности насыщения. В расчетах обнаруживается несомненная корреляция между значениями токов обмотки, соответствующих началу спада кривой B_0/B_1 на рис. 6,

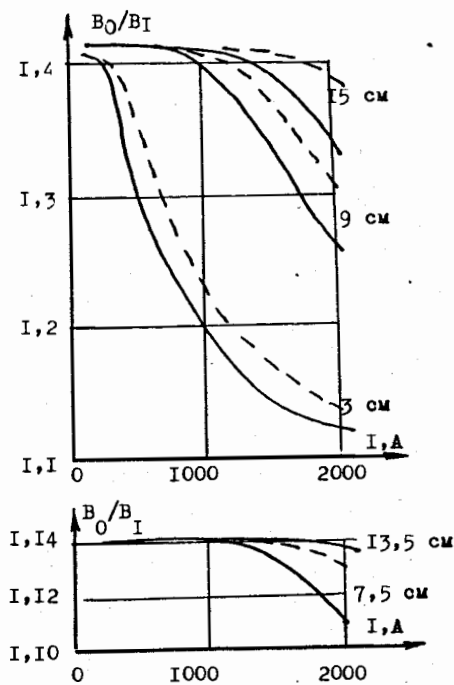


Рис. 6. B_0 — индукция магнита с экраном, B_1 — без экрана. Постоянная магнита $K = B_1/I = 1,86$ Т/кА. Внутренний радиус обмотки 4,25 см; наружный радиус обмотки 7,75 см. а) — экраны расположены вблизи обмотки и имеют внутренний радиус 9 см, б) — экраны расположены на некотором расстоянии от обмотки и имеют внутренний радиус 15,5 см; сплошные кривые соответствуют ферромагнетику с $4\pi M_{\text{max}} = 16$ кГс, прерывистые — ферромагнетику с $4\pi M_{\text{max}} = 20$ кГс. M_{max} — намагниченность насыщения. Представленные на рисунке кривые показывают зависимости от тока обмотки величины вклада экранов разной толщины в индукцию магнита.

и началу смещения распределений индукции на рис. 7. Оба эти эффекта связаны с появлением насыщения экрана. Для магнита с экраном толщиной 3 см кривая распределения при больших токах смещается в обратном направлении, что соответствует сильному насыщению всего объема экрана. При более толстом экране это явление не наблюдается.

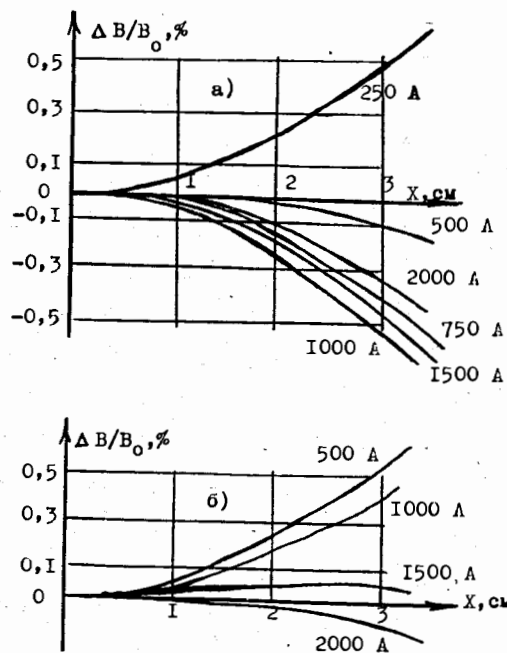


Рис. 7. Влияние насыщения экранов толщиной 3 см (а) и 9 см (б) на картину распределения индукции в апертуре диполя. Приведенные кривые соответствуют экранам с внутренним радиусом 9 см, изготовленным из ферромагнетика с $4\pi M_{max} = 16$ кГс. Показаны распределения индукции вдоль горизонтальной оси в апертуре магнита при указанных значениях токов обмотки.

Известно, что подбором толщины кольцевого экрана можно влиять на величину гармоник поля в апертуре диполя^{x)}. При исследовании влияния экрана на распределение индукции, в данной работе этот факт был подтвержден и дополнен обнаружением существования оптимальной толщины экрана, составляющей при рассмотренной геометрии магнита 13,5 см. Оптимальным такой экран является в том смысле, что при изменении тока обмотки от 50 А до 2000 А распределение индукции в апертуре магнита с таким экраном остается неизменным с точностью до 0,01 %. При толщине менее оптимальной распределение индукции вдоль горизонтальной оси в апертуре смещается с ростом тока в обмотке вниз, а при толщине больше оптимальной — вверх.

Подробно рассмотрено подавление за счет использования экрана полей рассеяния в окружающем магнит пространстве, где они могут оказывать нежелательное влияние на расположенную вблизи аппаратуру. В рассмотренных случаях экраны толщиной ≥ 12 см обеспечивают уменьшение полей рассеяния более чем в 10 раз. В то же время экран толщиной 9 см дает подавление полей рассеяния лишь в 3 раза, а сильно насыщающийся экран толщиной 3 см практически не меняет полей рассеяния магнита.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. Теоретические результаты I главы позволяют рассчитывать гистерезисные потери в магнитах с произвольным распределением индукции и позволяют объяснить наблюдаемые зависимости потерь в сверхпроводниках и добротностей СП магнитов от амплитуды индукции.

^{x)}J.H.Coupland et al., RPP/A 90, RHEL, July, 1972.

2. Предложены рекомендации по минимизации гистерезисных потерь и остаточных полей в СП магнитах. Измерения остаточных полей согласуются с расчетами и могут быть использованы для выбора величины индукции СП ускорителя, соответствующей инжекции пучка.
3. Теоретическими расчетами и экспериментами показан качественно разный характер распространения нормальной фазы в СП магнитах с каналами и в компаундированных обмотках. Из обмоток с каналами легче организовать эффективный вывод энергии, но они более подвержены опасности локального перегрева. В компаундированных обмотках велика опасность пробоя за счет быстрого распространения нормальной зоны. Из результатов рассмотрения процессов перехода СП обмотки в нормальное состояние могут быть получены соображения о требованиях к системам аварийного вывода энергии из магнитов.
4. Разработаны и реализованы в виде вычислительных программ методики оптимизации конфигурации обмотки и определения технологических допусков изготовления СП диполя с высокой однородностью поля в апертуре.
5. Проведены детальные исследования трехмерного распределения индукции в реальном магните конечной длины. Показано слабое влияние торцевых частей обмотки на распределение поля в среднем сечении магнита, что подтверждает правомерность моделирования полномасштабных СП ускорительных магнитов диполями длиной ~ 1 м.
6. Использование результатов работы при создании магнитов СПД-3 и СПД-3' позволило получить модели магнитов, соответствующие высоким требованиям ускорительной техники по однородности полей, идентичности магнитов и надежности при переходах в нормальное состояние.
7. Разработана и реализована в виде вычислительной программы для ЭВМ эффективная методика решения магнитоэлектростатических задач с учетом

- реальной зависимости магнитной проницаемости от поля.
8. Показано сильное в общем случае влияние эффектов насыщения экрана на величину и распределение индукции СП диполя ускорительного типа. В то же время показано, что за счет выбора толщины экрана, расположенного вблизи обмотки, можно обеспечить с высокой точностью практически неизменную картину распределения поля в апертуре во всем диапазоне рабочих токов магнита.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах [1-9].

1. Гребень Л.И., Миронов Е.С. Расчет потерь в сверхпроводниках II рода в импульсном магнитном поле.—Труды II Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., Наука, 1972, т. I, стр. 265-276.
2. Гребень Л.И. Остаточное поле в сверхпроводящем дипольном магните.—Труды Радиотехнического института АН СССР, 1972, № II, стр. 157-164.
3. Гребень Л.И., Галстьян Е.А., Миронов Е.С. Остаточные поля в сверхпроводящих магнитах.—Труды III Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., Наука, 1973, т. I, стр. 200-203.
4. Галстьян Е.А., Гребень Л.И., Миронов Е.С. Оптимизация конфигурации обмотки сверхпроводящего дипольного магнита с высокой однородностью поля в апертуре.—Труды Радиотехнического института АН СССР, 1973, № I5, стр. 100-109.
5. Галстьян Е.А., Гребень Л.И. Влияние несовершенства изготовления сверхпроводящего токопроводника и обмотки дипольного магнита на однородность поля в апертуре.—Труды Радиотехнического института АН СССР, 1973, № I5, стр. 110-117.
6. Галстьян Е.А., Гребень Л.И. Расчет трехмерного распределения магнитного поля сверхпроводящего дипольного магнита.—Труды Радиотехнического института АН СССР, 1973, № I5, стр. 118-128.

7. Алешин В.Ф., Гребень Л.И., Миронов Е.С. Исследование распространения нормальной фазы в сверхпроводящих токопроводниках различных типов.—В кн. : Сверхпроводящие материалы, М., 1974, ЦНИИАтоминформ, стр. 67-76.

8. Галстьян Е.А., Гребень Л.И., Миронов Е.С. Методика расчета полей сверхпроводящих магнитов с железными экранами.—Труды IV Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., 1975, Наука, т. II, стр. 136-137.

9. Галстьян Е.А., Гребень Л.И., Миронов Е.С. Влияние насыщения железного экрана на распределение поля сверхпроводящего магнита.—Труды Радиотехнического института АН СССР, 1976, №22, стр. 112-122.

Рукопись поступила в издательский отдел

28 июня 1979 года.