

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

Препринт.

МАГНИТНЫЕ ЭКРАНЫ, ПРОПУСКАЮЩИЕ ВИХРЕВОЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ.

Е.А.Абрамян, Л.Н.Бондаренко,
В.И.Волосов, А.А.Наумов, Б.В.Чириков.

Гор. Новосибирск

1963 г.

Вопросам экранирования от переменных магнитных полей посвящено большое количество работ (см., например, /1/). Однако, насколько нам известно, все рассмотренные до сих пор экраны примерно в одинаковой степени ослабляли как магнитное, так и электрическое поле. В последнее время в связи с разработкой некоторых новых типов ускорителей возникла задача создания экранов, которые бы значительно ослабляли магнитное поле, практически не уменьшая электрическое. Такая задача возникает, в частности, при конструировании бетатронного ускорителя, если ускоряющее и поддерживающее магнитные поля в нем изменяются независимо /2,3/. В этом случае необходимо тщательное экранирование камеры от рассеянного ускоряющего магнитного поля, в то время, как вихревое электрическое поле должно свободно проходить в камеру. Поскольку вихревое электрическое поле также является переменным, то внутри камеры возникает магнитное поле и, таким образом, коэффициент экранирования в этом случае принципиально ограничен. Легко показать, что максимальный коэффициент экранирования $\sim (\lambda/L)^2$, где λ — длина волны поля, L — размер системы, в обычных условиях достаточно велик ($\sim 10^7$ при $L \sim 1$ м, $\omega \sim 10^5$ сек⁻¹).

Настоящая работа посвящена описанию конструкций и методам расчета экранов, разделяющих переменные магнитное и электрическое поля.

§ 1. Конструкция экранов.

Принцип действия экранов, который можно понять из рис. I, состоит в следующем. Экранируемый магнитный поток окружается сплошным экраном, который, однако, не образует замкнутого витка вокруг потока, а навивается наподобие обмотки. Такой экран свободно пропускает вихревое электрическое поле, если только его частота не слишком велика так чтобы еще можно было пренебречь емкостными токами в экране. В то же время магнитный поток может выйти наружу только через длинную и узкую спиральную

цель, обладающую большим магнитным сопротивлением. Это и дает возможность отделить магнитное поле от электрического.

Первая конструкция подобных экранов, предложенная Г.И.Будкером и названная лабиринтом, исследована в отчете /3/. Эти экраны были предназначены для ускорителя бетатронного типа Б-1, устройство которого ясно из рис.2 /2/. Ускорение электронов происходит здесь в постоянном магнитном поле под действием вихревого электрического поля, создаваемого центральным потоком. Для нормальной работы ускорителя необходимо уменьшить рассеянные поля центрального сердечника в $10^2 - 10^3$ раз. Лабиринт состоит из 8 отдельных медных экранов, имеющих форму полукатушек с разрезом (рис.3). Разрезы соседних экранов сдвинуты на 90° или 180° .

Соединения отдельных частей экрана между собой должны иметь хороший металлический контакт (сварка, пайка), в противном случае магнитное поле легко проникает через шов. В крайнем случае можно использовать и болтовые соединения, однако, как показали специальные опыты, электрический контакт в этом случае должен обеспечиваться специальной прокладкой из посеребренной медной проволоки диаметром около 0,2 мм. Критерием хорошего контакта является расплющивание проволоки и вдавливание ее в соединяемые поверхности.

Коэффициент экранирования лабиринта на частоте 5 кгц около 300. Выбор оптимальных размеров и конфигураций экранов производились как расчетным путем (см.ниже), так и с помощью модельных экспериментов.

В следующих конструкциях использовались иные модификации экранов, в частности, показанная на рис.4. Здесь каждый экран представляет собой катушку, причем одна из щек каждой катушки припаивается после сборки.

Еще одна возможная конструкция лабиринта показана на рис.5. В этом случае лабиринт экранирует лишь разрез цельнометаллической камеры ускорителя СБ (см.также /7/). Лабиринт представляет собой две спирали по 24 витка из медной фольги толщиной 0,5 мм ($1/2$ скинслоя), вставленные друг в друга и изолированные тефлоновой лентой. Противоположные торцы

обеих спиралей припаивались к медным фланцам толщиной 6 мм, которые соединялись с камерой ускорителя через проволочку. Коэффициент экранирования лабиринта на частоте 4 кгц около 10^3 .

§ 2. Методы расчета лабиринтов.

Точный расчет распределения электромагнитного поля в такой сложной конфигурации как лабиринты практически неосуществим. Поэтому производится расчет более или менее грубых моделей реальной конструкции, который позволяет произвести оценку по порядку величины коэффициента экранирования и выбрать параметры экранов достаточно близкие к оптимальным.

Весь сложный процесс прохождения электромагнитного поля сквозь экраны мы разобьем на два основных процесса: 1) прохождение магнитного потока по щели лабиринта; 2) прохождение сквозь стенки экранов.

1. Прохождение магнитного потока по щели лабиринта оценивалось двумя методами. Во-первых, можно заменить сложную щель лабиринта прямой прямоугольной щелью, конфигурация поля в которой хорошо известна (см., например, /4/). Замена изогнутой щели на прямоугольную возможна, если ширина щели много меньше радиуса кривизны. Кроме того ясно, что можно пренебречь местами крутых (на 180°) поворотов щели вследствие их относительно малой длины. В прямой прямоугольной щели магнитное поле убывает по закону ($x \gg h$):

$$H = C, H_h e^{-\pi x/h} \quad (I)$$

где h - высота щели, x - координата вдоль щели; C , - коэффициент $\sim I$, зависящий от конфигурации магнитного поля при $x = 0$; H_h - составляющая поля при $x = 0$ вдоль h .

Во-вторых, как известно, распределение переменного магнитного поля в объеме, ограниченном хорошо проводящими стенками, совпадает с распределением плотности тока j в однородном проводнике той же формы, что и

объем, занятый магнитным полем. Это следует из уравнений: $\text{div } \vec{H} = \text{rot } \vec{H} = 0$ и аналогичных им уравнений: $\text{div } \vec{j} = \text{div } \vec{E} = 0$, $\text{rot } \vec{j} = \text{rot } \vec{E} = 0$, а также из одинаковых граничных условий: $H_n = j_n = 0$.

В интересующем нас случае проводник может быть приближенно заменен цепочкой сопротивлений, показанной на рис. 6. Свойства подобной цепочки подробно проанализированы в /5/. В частности, при $R_1 \ll R_2$ имеет место следующая зависимость напряжения на R_2 от номера ячейки n :

$$V_n = V_0 \cdot e^{-n \sqrt{R_1/R_2}} \quad (2)$$

Для прямоугольной цели можно принять приближенно:

$$R_1 \approx \frac{4 \Delta x}{h a}, \quad R_2 \approx \frac{h}{2 a \Delta x} \quad (3)$$

где Δx - размер ячейки, a - ширина цели. Тогда из (2) следует:

$$H \approx H_0 \cdot e^{-\sqrt{8} \cdot x/h} \quad (4)$$

Сравнение (1) и (4) показывает точность метода цепочки сопротивлений (МЦС)

В случае сложной формы цели, не поддающейся точному расчету, МЦС оказывается весьма эффективным. Например, для прямоугольной цели переменного сечения МЦС дает:

$$H(x) \approx H(0) \frac{h(0)}{h(x)} \sqrt{\frac{a(0)}{a(x)}} \cdot e^{-\pi \int_0^x \frac{dx}{h(x)}} \quad (5)$$

Другим примером применения МЦС является расчет анизотропного лабиринта, у которого искусственно увеличено сопротивление R_1 и уменьшено

R_2 . Этого можно достичь, располагая шихтованное железо внутри цели вдоль h . В этом случае R_1 практически не изменяется, а R_2 уменьшается в μ раз и, следовательно, длина затухания магнитного поля

уменьшается приблизительно в $\sqrt{\mu}$ раз (2).

Кроме уменьшения магнитного поля в щели необходимо учесть дополнительное ослабление поля при выходе магнитного потока из щели в экранируемый об"ем. Грубую оценку ослабления можно сделать следующим образом: для достаточно длинной щели полный магнитный поток, проходящий через щель и равный согласно (1)

$$\Phi = a \int_x^\infty H \cdot dx = H(x) \frac{h a}{\pi} \quad (6)$$

практически не зависит от геометрии экранируемого об"ема, так как он определяется щелью. Отсюда, зная конкретную геометрию установки, легко определить дополнительное ослабление. Расчет МПС приводит в этом случае к следующему изменению формулы (2):

$$V_n = V_0 e^{-n \sqrt{R_1/R_2}} \cdot \frac{2 R_n}{R_n + \sqrt{R_1 R_2}} \quad (7)$$

где R_n - эквивалентное сопротивление экранируемого об"ема.

Следует отметить, что эффективная ширина щели, определяющая проходящий поток согласно (6), несколько больше геометрической за счет магнитного поля в скин-слое. Если толщина стенки лабиринта d много больше толщины скин-слоя Δ , то $a_{\text{эф}} = a + \sqrt{2} \cdot \Delta$; при $d \ll \Delta$ $a_{\text{эф}} \approx a + d$. В случае железных стенок лабиринта толщина скин-слоя уменьшается в $\sqrt{\mu}$ раз, но поток по нему увеличивается в μ раз, поэтому эффективная ширина $a_{\text{эф}} = a + \sqrt{2} \mu \Delta$ резко возрастает.

2) Прохождение магнитного потока сквозь стенки лабиринта рассчитывается на основании хорошо известной формулы скин-эффекта в сплошном металле:

$$H = H_0 e^{-\frac{x}{\Delta}(1+i)}; \quad (8)$$

где $\Delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\mu\sigma\omega}}$ - толщина скин-слоя. Прежде всего необходимо обобщить (8) на слоистую среду, какой является лабиринт. В случае, если толщина стенок и промежутков между ними много меньше Δ , слоистую среду можно рассматривать как однородную [6] со средними значениями $\bar{\sigma}$, $\bar{\mu}$. Эффективный скин-слой для такой среды равен:

$$\Delta_1 = \frac{c}{\sqrt{2\pi\omega\bar{\sigma}\bar{\mu}}} \quad (9)$$

Из этой формулы видно, что между стенками лабиринта выгодно располагать железные пластинки.

При выходе магнитного потока из стенок лабиринта в экранируемый объем имеет место дополнительное ослабление поля совершенно аналогично предыдущему случаю. Проходящий поток равен $\Phi = H(x) \cdot \Delta/\sqrt{2}$ (на единицу длины).

3) Учет совместного прохождения магнитного поля по щели и сквозь стенки лабиринта удобнее всего производить по МПС. Для этого рассмотрим каждую ячейку лабиринта (стенка и щель) как три магнитных сопротивления (см. рис. 7). Сопротивление R_2 , через которое замыкается как магнитный поток, проходящий по щели, так и поток, проходящий сквозь стенку; сопротивление R_1' магнитному потоку в щели и сопротивление R_1'' магнитному потоку, проходящему сквозь стенку. Оба последних сопротивления включены параллельно и соответствуют сопротивлению R_1 на рис. 6. Используя (7), найдем для коэффициента ослабления магнитного поля лабиринтом выражение

$$K = \left| \frac{H_0}{H_i} \right| \approx \frac{1}{2} \left| \left(1 + \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{R_H} \right) e^{\frac{e}{\Delta_2}} \right|; \quad (10)$$

где e - полная толщина лабиринта; $1/R_1 = 1/R_1' + 1/R_1''$

$$\Delta_2 = (a+d) \sqrt{R_2/R_1} = \sqrt{\Delta_1^2/2i + \Delta_2^2}$$

На основании приведенных формул можно оценить оптимальные параметры лабиринта. В частности, оптимальная толщина стенок не всегда больше

скин-слоя. Например, для лабиринта ускорителя СБ (см. выше) оптимальная толщина составляет около $\Delta/2$. Все предыдущие расчеты касались экранирования в установившемся режиме. В переходном режиме сразу же после включения переменного магнитного поля процесс прохождения поля сквозь металл протекает значительно сложнее. В первый момент ($t \ll \frac{\sigma d^2}{c^2}$, d - толщина металла) коэффициент экранирования значительно больше, чем в установившемся режиме, а затем, при $t \sim \frac{\sigma d^2}{c^2}$, наоборот, много меньше. Более подробно этот вопрос рассмотрен в /8/.

§ 3. Сравнение с экспериментом.

Для иллюстрации точности оценочных формул приведем часть экспериментальных данных по лабиринту ускорителя СБ. Измерялась зависимость коэффициента экранирования в установившемся (K_y) и переходном (K_n) режимах. В таблице I эти данные сравниваются с расчетными.

Таблица I.

R кгц	K_y эксп.	K_y расч.	K_n эксп.	K_n теор.
2,7	370	405	-	-
3,3	620	570	1200	1880
4,8	1300	1170	-	-
7,5	2800	3170	3400	2240
8,5	8000	4350	-	-
15,6	30000	25560	10000	4760

Пользуемся случаем выразить нашу благодарность Г.И.Буджеру и А.М.Стефановскому за полезные дискуссии и В.П.Федунину за разработку технологии и изготовление лабиринтов.

Литература

1. Г.Каден. Электромагнитные экраны, ГЭИ, М-Л (1957)
2. Г.И.Будкер, А.А.Наумов. Симпозиум *CERN* (1956)
3. Л.Н.Бондаренко, Е.А.Абрамян. Отчет ИЯФ СОАН № 215
4. Д.И.Шапиро. Радиотехника, 10, № 4, 36 (1955)
5. В.И.Волосов, Б.В.Чириков. Отчет ИАЭ № 286/Б (1957).
6. УФН, 49, 325 (1953)
7. *L'age nucléaire*, 1, 30, (1956)
8. В.И.Волосов, Б.В.Чириков. ЖТФ, 30, 508 (1960)

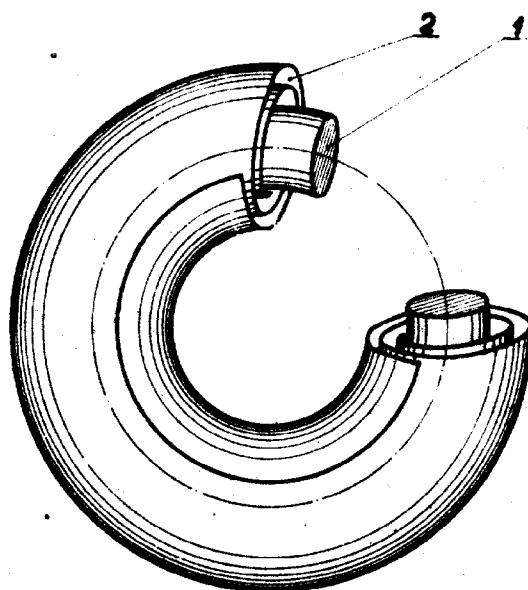


Рис.1. Принципиальная схема магнитного экрана, пропускающего вихревое электрическое поле.
 1 - Магнитопровод. 2 - Металлический экран.

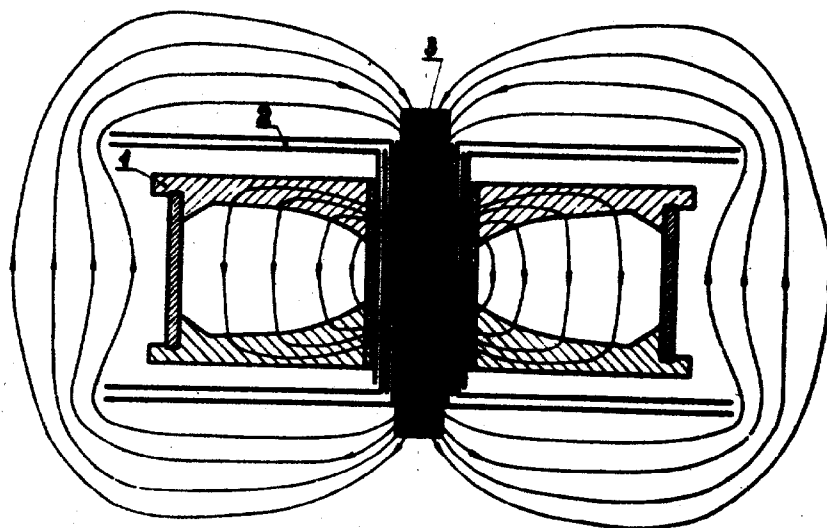


Рис.2. Магнитная система установки Б-1. 1 - Магнит, создающий постоянное магнитное поле. 2 - Экраны. 3 - Сердечник создающий вихревое электрическое поле.

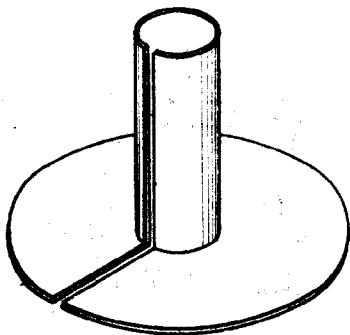


Рис.3.

Конструкция отдельного экрана
системы экранирования Б-І.

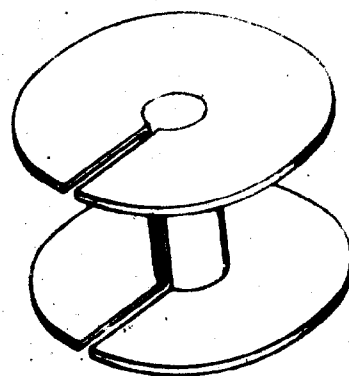


Рис.4.

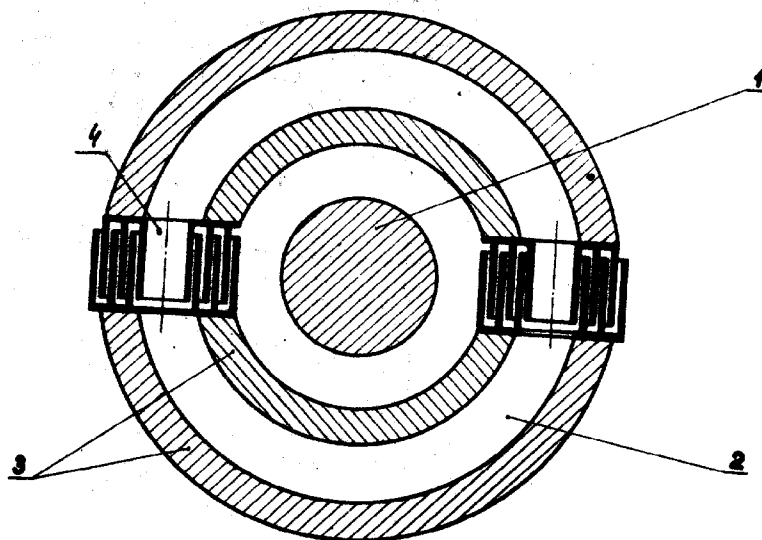


Рис.5. Разрез камеры ускорителя СБ с лабиринтом.

- 1 - Сердечник, создающий ускоряющее электрическое поле.
- 2 - Экранируемый об"ем.
- 3 - Стенки камеры.
- 4 - Лабиринт.

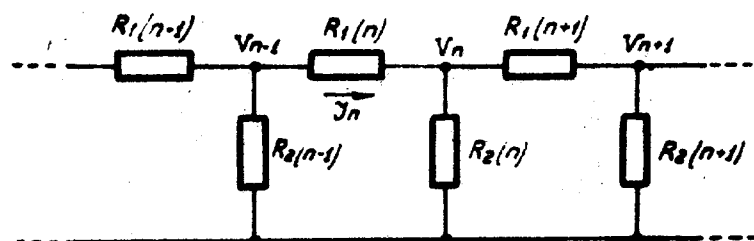


Рис.6.

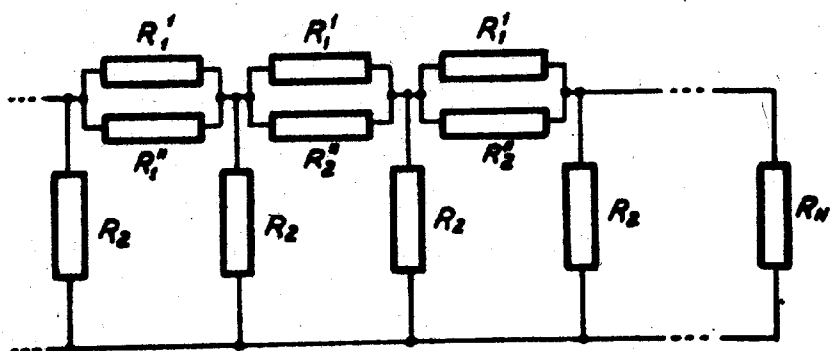


Рис.7.

Ответственный за выпуск Ф.А.Цельник
Подписано к печати 17.IV.64 г, № МН00568
Формат бумаги 270х190. Тираж 150
Заказ № 039 Бесплатно

Отпечатано на ротопринте в Институте ядерной
физики СО АН СССР.