

Кафедра теоретических основ электротехники

**Отчет**  
**по лабораторной работе № 6**  
**по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»**  
Тема: «ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ЭКРАНИРОВАНИЕ»

Студенты гр. 3583, ФИБС

---

---

---

Агафонова Р.С.

Романова Е.П.

Демидов Д.А.

Преподаватель

---

Кондаков А.В.

Санкт-Петербург

2025 г.

**Цель работы:** исследование экранирующего действия проводящих коротких тонкостенных цилиндров и прямоугольных пластин в переменном электромагнитном поле.

### Основные теоретические положения

Электромагнитные экраны применяют как для защиты отдельных элементов, блоков, устройств и целых комплексов различных электротехнических систем от внешнего переменного электромагнитного поля, так и для ослабления внешнего поля самих устройств. В качестве экранов используют металлические оболочки.

Экранирование электромагнитного поля  $\vec{H}_0$  открытыми проводящими оболочками (рис. 1) возможно за счет возбуждения в них вихревых токов  $\vec{J}$ , создающих встречные компенсирующие поля  $\vec{H}_i$ . На основании закона электромагнитной индукции электродвижущая сила, наводимая в проводящем контуре, равна отрицательной скорости изменения магнитного потока, пронизывающего этот контур. Данный факт говорит о том, что возникающая в проводящем контуре ЭДС вызывает в нём ток такого направления, при котором создаваемый им вокруг контура вторичный магнитный поток препятствует изменению первичного магнитного поля. В результате внутри контура внешний магнитный поток ослабляется встречным вторичным магнитным потоком. Ослабление поля зависит от сопротивления контура.

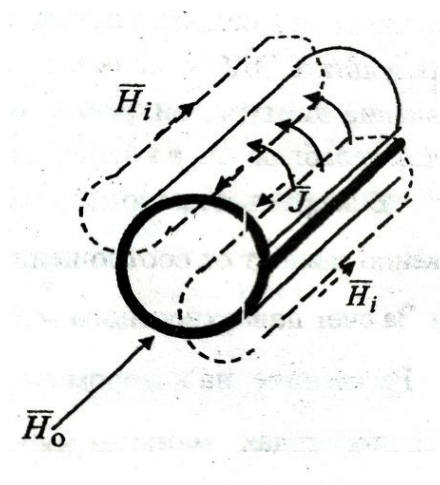


Рисунок 1.

На высоких частотах сопротивление проводящего контура практически равно его реактивной части, т.е. индуктивному сопротивлению, пропорциональному частоте. С ростом частоты увеличивается сопротивление контура, но пропорционально частоте увеличивается и величина ЭДС. Поэтому на высоких частотах ослабление поля слабо зависит от частоты.

Коэффициент экранирования  $S$  определяется как отношение напряженности магнитного поля внутри экрана  $H$  к напряженности внешнего магнитного поля  $H_0$ : 
$$S = \frac{\dot{H}}{\dot{H}_0}.$$

На высоких частотах коэффициент экранирования стремится к нулю. В этом случае встречный магнитный поток внутри экрана полностью компенсирует внешний магнитный поток.

С уменьшением частоты внешнего электромагнитного поля реактивное индуктивное сопротивление контура становится соизмеримым с активной составляющей сопротивления, определяемой тепловыми потерями в контуре. В результате ЭДС с понижением частоты уменьшается быстрее, чем сопротивление контура, вихревые токи и, следовательно, встречный магнитный поток ослабляются, а коэффициент экранирования стремится к единице.

В закрытых проводящих оболочках коэффициент экранирования существенно зависит от соотношения её толщины и глубины проникновения волны. За счет поверхностного эффекта внешнее поле дополнительно ослабляется. Расстояние, на котором амплитуда вектора  $\vec{E}_{эл}$  или  $\vec{H}_{эл}$  волны в проводящих средах уменьшается в  $e = 2,71$  раз, называется глубиной проникновения  $\Delta = \frac{1}{\alpha} \cong \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_{эл} \gamma_{эл}}}.$

## Обработка результатов

### 1. Зависимости напряжений от положения держателя в магнитном поле.

Зависимости  $U_z(z)$  и  $U_y(z)$  от перемещения держателя относительно куба из оргстекла при перемещении между катушками Гельмгольца на расстояние  $L$  вдоль оси « $z$ » представлены в таблице 1.

Таблица 1

$L, \text{ см}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_z(z), \text{ мВ}$	21,5	21,5	21,5	21,5	22	22	22	22	22	21	20	19	18
$U_y(z), \text{ мВ}$	2,2	2,15	2	2	1,95	1,95	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,85	1,6

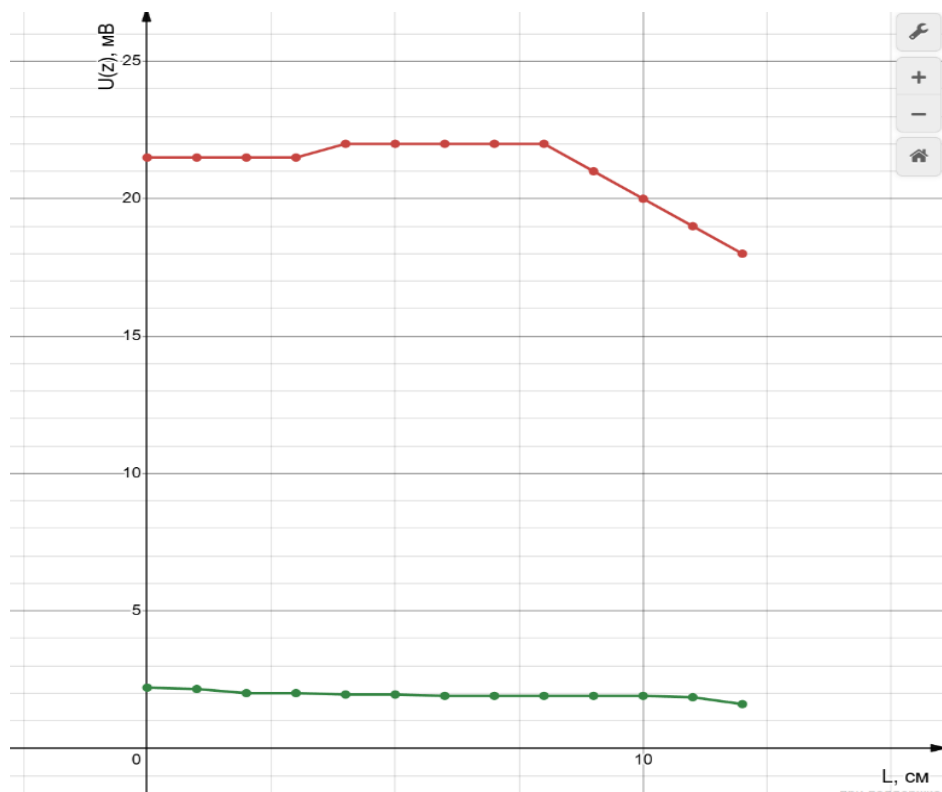


Рисунок 2. График зависимости напряжений  $U_z(z)$  и  $U_y(z)$  (куб из оргстекла без экрана).

Зависимости  $U_z(y)$  и  $U_y(y)$  от перемещения держателя относительно куба из оргстекла при перемещении между катушками Гельмгольца на расстояние  $L$  вдоль оси «у» представлены в таблице 2.

Таблица 2

$L, \text{ см}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_z(y), \text{ мВ}$	38	37,5	37,5	37,5	37,5	36	36	35	34	32	30	27	24
$U_y(y), \text{ мВ}$	5	5	4,5	4,5	4,5	4	4	4	4	4	3,5	3,5	3,5

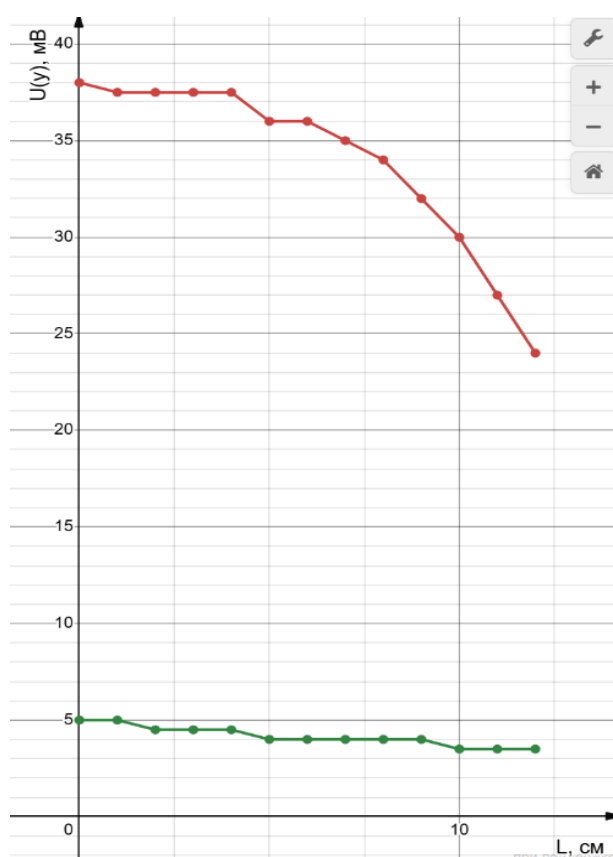


Рисунок 3. График зависимости напряжений  $U_z(y)$  и  $U_y(y)$  (куб из оргстекла без экрана).

Зависимости  $U_z(z)$  и  $U_y(z)$  от перемещения датчика держателя вдоль оси «z» на расстояние L относительно куба из оргстекла с экраном по бокам вдоль оси «z» представлены в таблице 3.

Таблица 3

L, см	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_z(z)$ , мВ	22,5	22,5	22,5	22,5	22	22	22	22	21,5	21,5	20,5	19,5	18,5
$U_y(z)$ , мВ	1,35	1,45	1,3	0,75	0,45	0,35	0,45	0,42	0,52	0,43	0,22	0,28	0,12

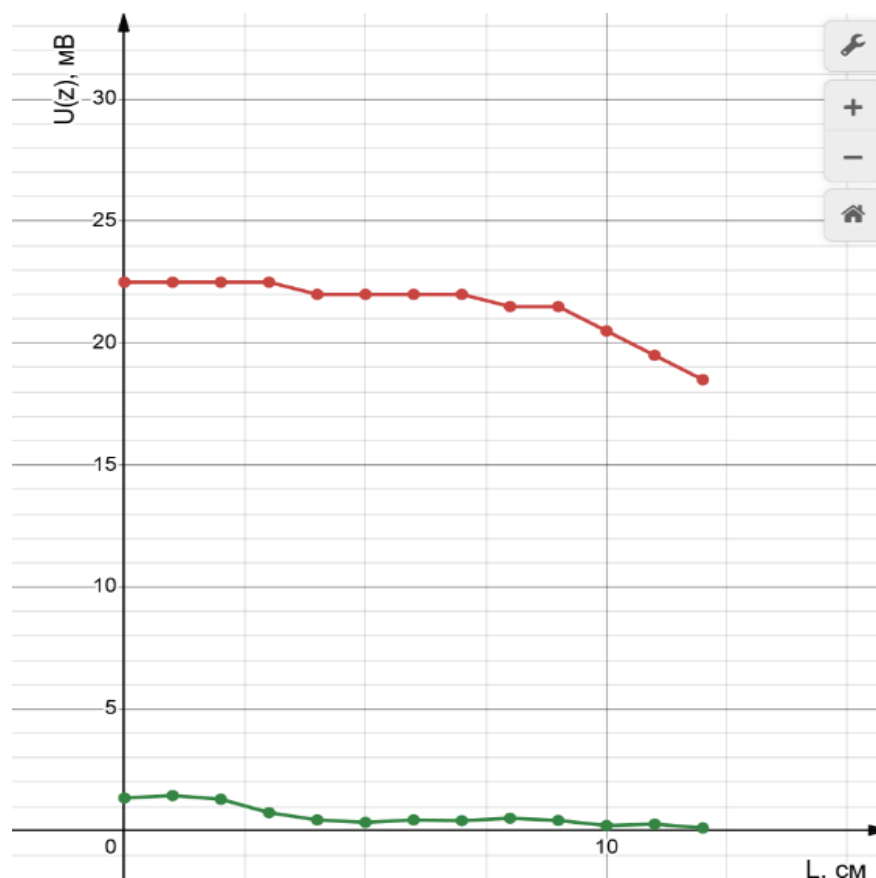


Рисунок 4. График зависимости напряжений  $U_z(z)$  и  $U_y(z)$  (куб с экраном по бокам вдоль оси «z»).

Зависимости  $U_z(y)$  и  $U_y(y)$  от перемещения держателя вдоль оси «у» на расстояние  $L$  относительно куба из оргстекла с экраном по бокам вдоль оси «у» представлены в таблице 4.

Таблица 4

L, см	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_z(y)$ , мВ	20	22	26	31	33	35	36	36	34	32	30	27	24
$U_y(y)$ , мВ	3,1	3,5	3	3,8	4,4	4,2	4	3,7	3,9	3,6	3,8	3,4	2,8

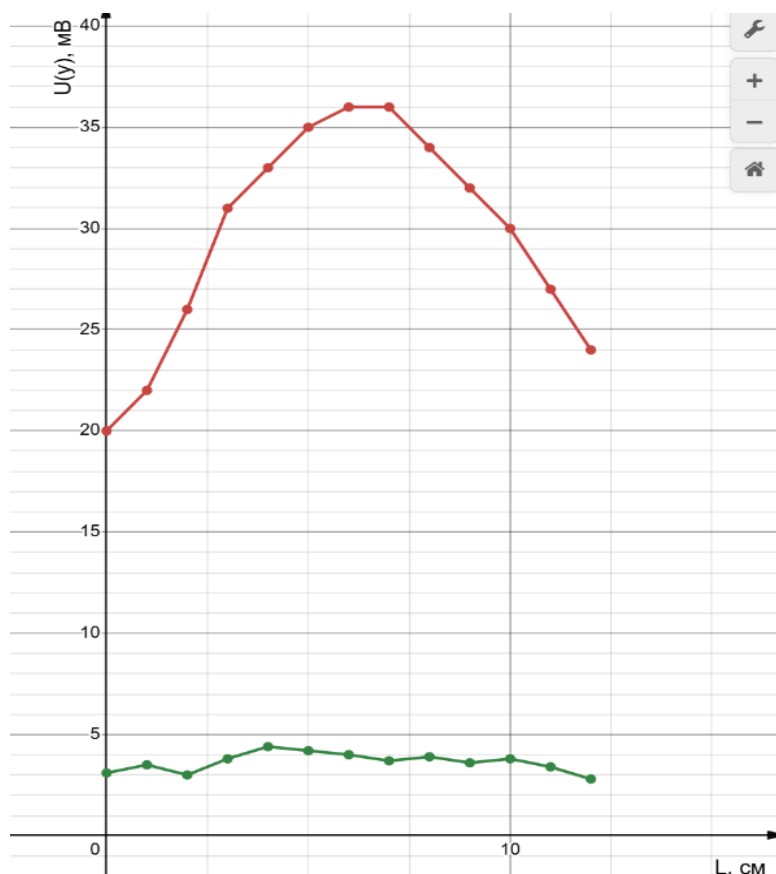


Рисунок 5. График зависимости напряжений  $U_z(y)$  и  $U_y(y)$  (куб с экраном по бокам вдоль оси «у»).

Зависимости  $U_z(z)$  и  $U_y(z)$  от перемещения держателя вдоль оси «z» на расстояние  $L$  относительно цилиндра из оргстекла с экраном по всей боковой поверхности с прорезью вдоль оси «z» представлены в таблице 5.

Таблица 5

L, см	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$U_z(z)$ , мВ	22	22	21,5	21,5	21,5	21,5	22	22	21,5	21	20,5	19,5	18,5
$U_y(z)$ , мВ	2,3	2,25	2,4	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,6	2,6	2,45	2,4

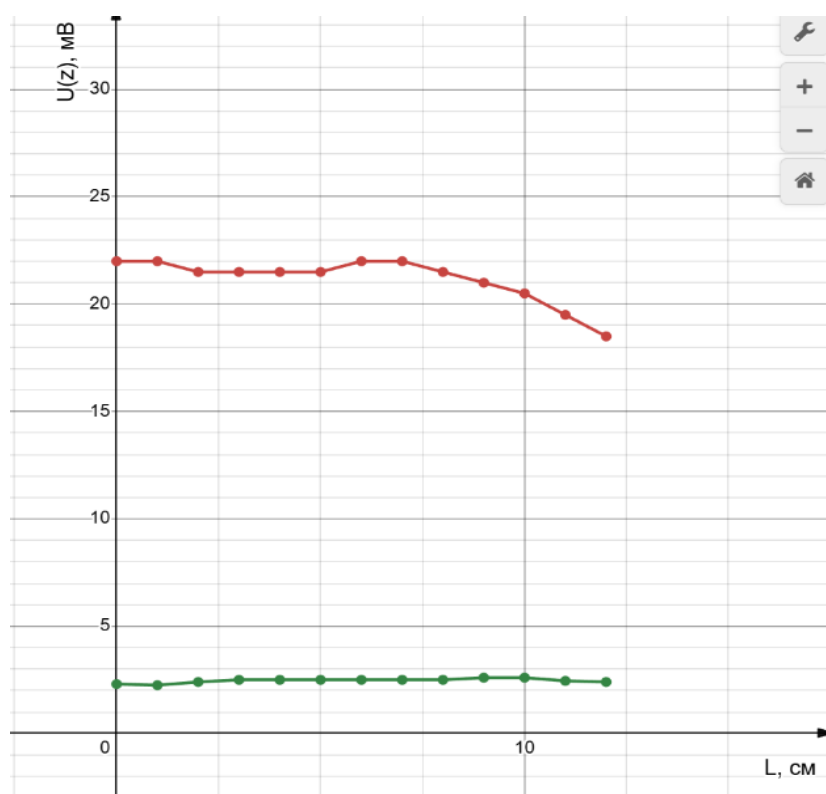


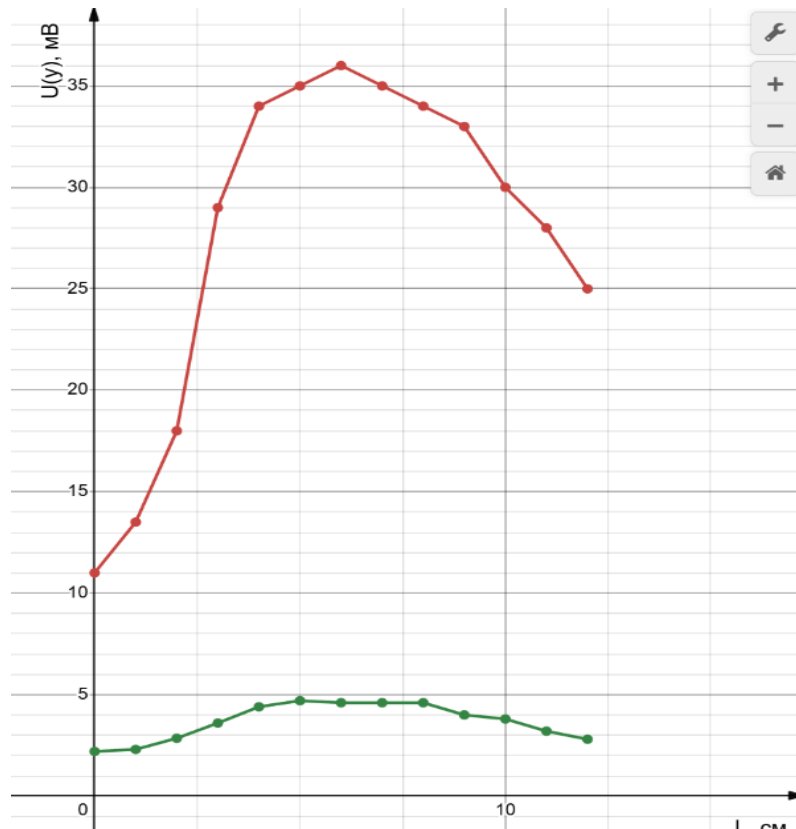
Рисунок 6. График зависимости напряжений  $U_z(z)$  и  $U_y(z)$  (цилиндр с прорезью).

Зависимости  $U_z(y)$  и  $U_y(y)$  от перемещения держателя вдоль оси «y» на расстояние  $L$  относительно цилиндра из оргстекла с экраном по всей боковой поверхности с прорезью вдоль оси «y» представлены в таблице 6.



Таблица 6

L, см	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
U <sub>z</sub> (y), мВ	11	13,5	18	29	34	35	36	35	34	33	30	28	25
U <sub>y</sub> (y), мВ	2,2	2,3	2,85	3,6	4,4	4,7	4,6	4,6	4,6	4	3,8	3,2	2,8

Рисунок 7. График зависимости напряжений  $U_z(y)$  и  $U_y(y)$  (цилиндр с прорезью).

## 2. Построение АЧХ коэффициента экранирования $S(f)$

Коэффициент экранирования  $S$  получим по формуле  $\dot{S} = \frac{\dot{H}}{\dot{H}_0}$ , а так как напряжение  $U_z(z)$  пропорционально составляющей  $H_z$  вектора напряжённости магнитного поля, коэффициент легко определить через уравнение

$$S = \frac{U_z(0)}{U_z(6)},$$

где  $U_z(0)$  – напряжение, пропорциональное составляющей  $H_z$  вектора напряжённости магнитного поля внутри экрана;  $U_z(6)$  – напряжение, пропорциональное составляющей  $H_z$  вектора напряжённости магнитного поля вне экрана.

Таблица 7

$f$ , кГц	2	10	20	30	50	100
$U_z(0)$ , мВ	0,8	1	0,7	1,15	1,8	0,46
$U_z(6)$ , мВ	0,9	3	8	12	18	20
$S(f)$	0,87	0,33	0,088	0,096	0,1	0,023

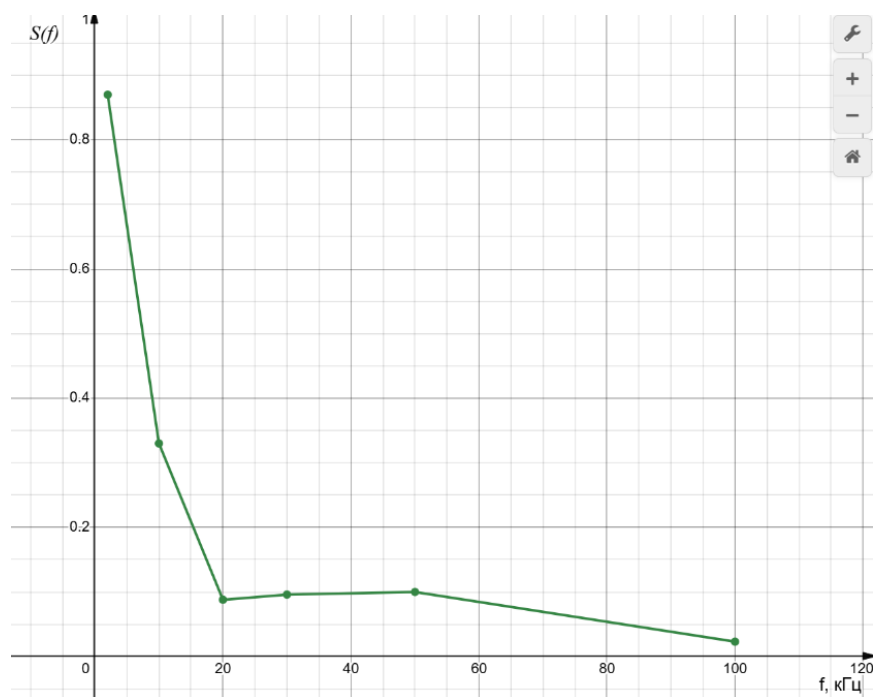


Рисунок 8. АЧХ коэффициента экранирования  $S(f)$

## Ответы на вопросы

1. За счёт каких токов возможно экранирование электромагнитного поля открытыми проводящими оболочками?

Экранирование электромагнитного поля открытыми проводящими оболочками осуществляется за счет вихревых токов, которые возбуждаются в проводящей оболочке. Эти токи создают встречные компенсирующие поля, которые противодействуют внешнему электромагнитному полю.

Принцип работы основан на законе электромагнитной индукции: когда переменное магнитное поле пронизывает проводящую оболочку, в ней появляется электродвижущая сила (ЭДС). Возникающая ЭДС вызывает в проводнике ток такого направления, при котором создаваемый им вторичный магнитный поток противодействует изменению первичного магнитного поля.

В результате внутри проводящего контура происходит ослабление внешнего магнитного поля за счет встречного вторичного магнитного потока.

2. В виде какого отношения определяется коэффициент экранирования?

Коэффициент экранирования  $S$  определяется как отношение напряженности магнитного поля внутри экрана  $H$  к напряженности внешнего магнитного поля  $H_0$

$$S = \frac{H}{H_0}$$

3. Как устроена экспериментальная установка для исследования экранирования открытыми проводящими оболочками?

Схема установки приведена на рисунке 9.

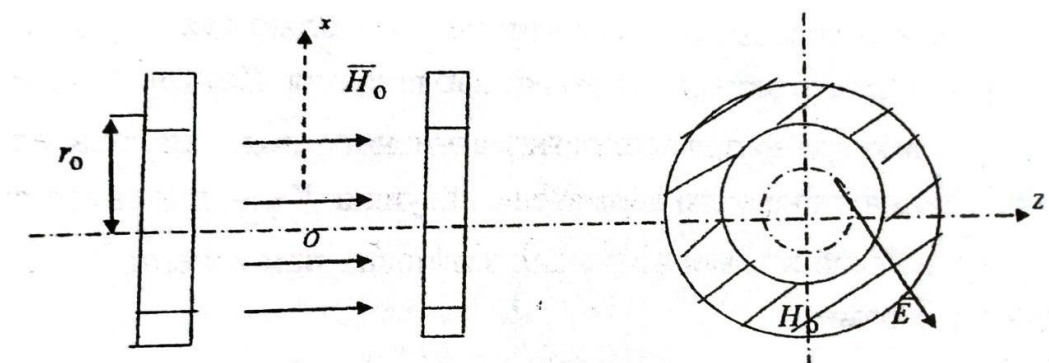


Рисунок 9. Схема экспериментальной установки

На установке с двумя коаксиальными плоскими катушками Гельмгольца исследуется экранирующее действие незамкнутого на торцах латунного цилиндра, такого же цилиндра с продольным разрезом и двух параллельных прямоугольных пластин на частотах 10...200 кГц.

Однородное магнитное поле в ограниченной области пространства создается между двух коаксиальных плоских катушек Гельмгольца, расположенных на расстоянии, равном их радиусу, при одинаковом направлении токов в их обмотках.

Последовательно соединенные катушки Гельмгольца подключены к генератору. Экраны, укрепленные на специальных стержневых подставках, вносятся в область однородного магнитного поля. При этом отдельно исследуются два режима, когда вектор  $H$  параллелен стенкам экрана (продольное поле) и перпендикулярен им (поперечное поле).

Для измерения напряженности магнитного поля используются две миниатюрные плоские катушки  $K1$  и  $K2$ , расположенные во взаимно перпендикулярных плоскостях. Катушки вмонтированы в цилиндрический держатель из оргстекла. На его корпусе нанесена шкала, позволяющая определять расстояние от точки 0 (центр экрана) до точки наблюдения. Катушка  $K1$  измеряет составляющую вектора напряженности магнитного поля, направленную параллельно оси цилиндрического держателя, катушка  $K2$  - вдоль его радиуса.

Индукцированные в измерительных катушках напряжения регистрируются милливольтметрами.

4. Как определяется амплитудно-частотная характеристика коэффициента экранирования открытыми проводящими оболочками?

Амплитудно-частотная характеристика коэффициента экранирования открытыми проводящими оболочками определяется как отношение напряженности магнитного поля внутри экрана пропорциональное, к напряженности магнитного поля катушек Гельмгольца вне экрана.

$$S = \frac{U_z(0)}{U_z(6)},$$

где  $U_z(0)$  – напряжение, пропорциональное составляющей  $H_z$  вектора напряжённости магнитного поля внутри экрана;  $U_z(6)$  – напряжение, пропорциональное составляющей  $H_z$  вектора напряжённости магнитного поля вне экрана.

**Вывод:** в результате выполнения лабораторной работы было исследовано экранирующее действие проводящих коротких тонкостенных цилиндров и прямоугольных пластин в переменном электромагнитном поле. Были построены графики зависимости напряжения от перемещения держателя.

Был сделан вывод – на высоких частотах коэффициент экранирования стремится к нулю, потому что происходит полная компенсация полей: на высоких частотах встречный магнитный поток внутри экрана полностью компенсирует внешний первичный магнитный поток потому, что индуцируемые вихревые токи в экране создают собственное магнитное поле, это поле направлено противоположно внешнему полю, в результате происходит полная компенсация полей. На низких же частотах коэффициент экранирования стремится к единице. Это связано с тем, что реактивное индуктивное сопротивление контура становится соизмеримым с активной составляющей сопротивления. В результате ЭДС с понижением частоты уменьшается быстрее, чем сопротивление контура, вихревые токи ослабевают, и встречный магнитный поток уменьшается. Таким образом на высоких частотах эффективность экранирования максимальна