

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ

Цель работы - исследование магнитоэлектростатического и электромагнитного экранирования, которое связано с проникновением соответственно постоянного и переменного магнитного поля сквозь поверхность экрана; изучение коэффициента экранирования, зависящего от различных факторов: формы и размера экрана, толщины и свойств материала, частоты внешнего электро-

магнитного поля, наличием щелей в отдельных частях экрана, знакомство с теоретическими основами расчета основных задач электромагнитного экранирования.

## I. Основные теоретические положения

Экранирование имеет исключительно большое практическое значение. Экран представляет собой оболочку из различных материалов. Ферромагнитные экраны применяются для защиты электрических цепей, помещенных внутри экрана, от влияния внешних как постоянных магнитных полей, так и переменных магнитных полей невысоких частот. Экраны из неберровидящих материалов широко применяются для экранирования электрических цепей от внешних электромагнитных полей высокой частоты.

### I.1. Магнитоэстатическое экранирование

Экран, например цилиндрический, помещенный в постоянное внешнее магнитное поле (рис. I, а) с напряженностью  $H_0$ , намагничивается и возбуждает поле (рис. I, б), направленное против внешнего, за счет чего результирующее поле внутри экрана ослабляется (рис. I, в). Эффект магнитоэстатического экранирования определяется по частоте линий напряженности внешнего поля  $H_0$  и внутри экрана  $H_i$ . Для характеристики степени экранирования вводится величина, которая называется коэффициентом экранирования, равная отношению напряженности поля в полости экрана  $H_i$  к напряженности внешнего поля  $H_0$ :

$$S = \frac{H_i}{H_0} \quad (1)$$

Она характеризует качество экрана, которое зависит от его геометрических размеров и материала. Обратная величина

$$a = \frac{H_0}{H_i} \quad (2)$$

показывает, во сколько раз внешнее поле ослабляется действием экрана, и называется степенью экранирования.

Цилиндрический экран (рис. 2) представляет собой полую трубу, длина которой много больше радиуса, поэтому при расположении такой трубы поперек внешнего поля  $H_0$ , поле в центральной части экрана можно считать однородным. Степень экранирования такого экрана определяется формулой [1].

$$a = 1 + \frac{\Delta}{2R_2} \mu, \quad (3)$$

где  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала экрана,  $R_1, R_2$  — внутренний и внешний радиусы экрана,  $\Delta = R_2 - R_1$  — толщина стенок экрана.

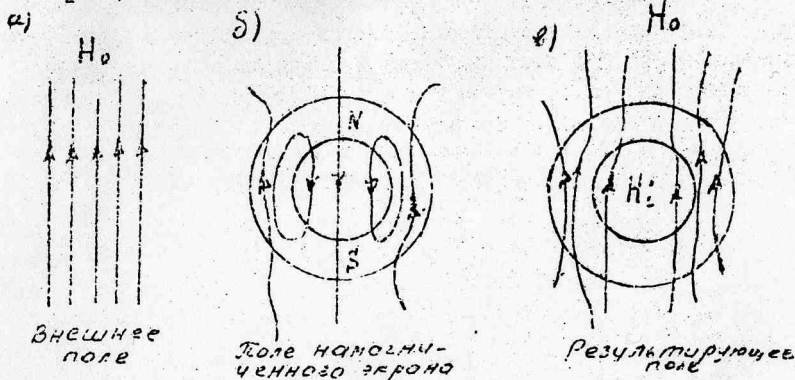


Рис.1

Выражение (3) справедливо при выполнении условий  $\Delta \ll R_2$  и  $\mu \gg 1$ .

Для сферического экрана при тех же допущениях степень экранирования определяется выражением

$$a = 1 + \frac{2\Delta}{3R_2} \mu, \quad (4)$$

где  $R_2$  — внешний радиус сферы,  $\Delta$  — толщина стенок экрана.

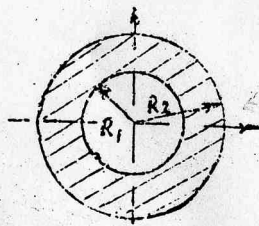


Рис.2

## 1.2. Электромагнитное экранирование

Электромагнитное экранирование применяется в случае переменных электромагнитных полей. В качестве электромагнитных экранов используются металлические оболочки, экранирующее действие которых обусловлено поглощением энергии электромагнитного поля внутри экрана. Экранирующее действие растет с увеличением толщины стенки экрана  $\Delta$ , угловой частоты  $\omega$ , удельной проводимости  $\delta$  и абсолютной магнитной проницаемости экрана:  $\mu a = \mu \mu_0 \left( \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Г}{м} \right) \mu$  — магнитная прони-

цаемость материала. Параметр, который характеризует действие этих экранов, называется постоянной вихревых токов:

$$P = \sqrt{j \omega \mu \sigma} \quad (5)$$

Переменное электромагнитное поле, проникая внутрь экрана, постоянно затухает. Это связано с тем, что в каждом слое экрана протекают вихревые токи, действие которых ослабляет внешнее поле. При высоких частотах внешнего поля экран обычно изготавливается из хорошо проводящего материала (меди, алюминия), при низких - используется ферромагнитный материал с  $\mu \gg 1$ .

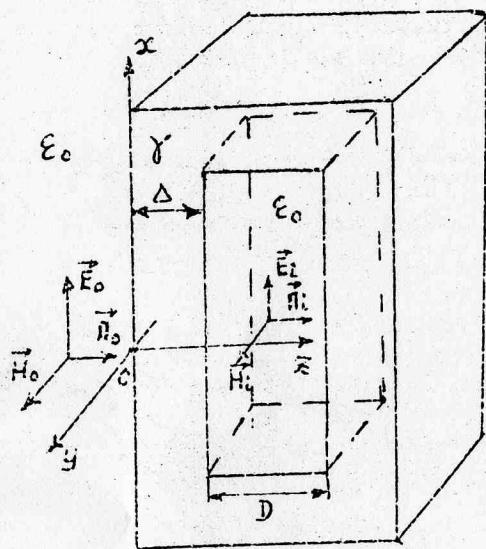


Рис.3

Плоский экран можно представить в виде коробчатой поллой конструкции (рис.3), толщина стенок которой  $\Delta$ . Плотность энергии электромагнитного поля вне экрана определяется вектором Пойнтинга  $\vec{\Pi}_0 = \vec{E}_0 \times \vec{H}_0$ , где  $\vec{H}_0$ ,  $\vec{E}_0$  - напряженность магнитного и электрического полей внешнего поля.

Плотность энергии электромагнитного поля для точек в теле экрана ( $z < \Delta$ ) имеет вид

$$\Pi = \sqrt{\frac{\omega \mu \sigma}{\gamma}} H_{m_0}^2 e^{-2\kappa z} \sin(\omega t - \kappa z) \cdot \sin(\omega t - \kappa z + \frac{\pi}{4}), \quad (6)$$

где  $H_{m_0}$  - амплитуда напряженности магнитного поля на поверхности экрана ( $z = 0$ );  $\gamma$  - удельная проводимость материала экрана;  $\kappa = \text{Re } P = \text{Im } P$  - коэффициент затухания и коэффициент фазы распространения электромагнитной волны в проводящей среде;  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  - частота изменения электромагнит-

ного поля;  $Z$  - расстояние вдоль оси  $Z$ ;  $t$  - время.

Из выражения (6) следует, что величина энергии уменьшается с изменением координаты  $Z$  пропорционально множителю  $e^{-2kz}$ , который уменьшается от значения, равного 1 для  $Z = 0$ , до  $e^{-2k\Delta}$  для  $Z = \Delta$ . Пропорционально множителю  $e^{-2kz}$  уменьшаются напряженности полей.

Величина  $K$  определяется выражением

$$K = \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \gamma}{2}} \quad (7)$$

и для проводящих сред имеет величину  $\approx 100 \text{ м}^{-1}$  и более в диапазоне частот от 50 Гц и выше. Поэтому энергия электромагнитного поля быстро убывает. Так для диапазона радиочастот толщина стенки экрана может составлять величину долей миллиметра.

С коэффициентом фазы  $K$  связано определение длины волны  $\lambda$  в проводящей среде, на которой фаза колебания изменяется на  $2\pi$ :

$$\lambda = \frac{2\pi}{K} = 2\pi \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \gamma}} \quad (8)$$

Отношение  $\epsilon$  амплитуд напряженности полей на расстоянии  $Z = \lambda$  от поверхности равно  $e^{-2\pi} = 0,00187$ , т.е. на этом расстоянии волна практически затухает. Вывод уравнений (7) и (8) дан в прил. 5. Таким образом, на расстояние  $Z = \lambda/2$  от поверхности проникает только  $e^{-2\pi} \cdot 100 = 0,187\%$  энергии, поглощаемой в проводящей среде. Поэтому можно считать, что волна затухает уже на расстоянии, в два-три раза меньшем длины волны. В табл. I приведены значения длины волны для различных материалов.

Таблица I

Длина волны в проводящей среде, см

Частота, Гц	Алюминий	Сталь	Латунь
	$\mu=1, \gamma=2 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом м}}$	$\mu=50$ $\gamma=1,5 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом м}}$	$\mu=1$ $\gamma=5,8 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом м}}$
50	10,00	1,53	5,89
500	3,13	0,53	1,86
1000	2,2	0,36	1,3
2000	1,6	0,25	0,93

Наличие в выражении (6) коэффициента фазы  $K$  указывает на изменение начальной фазы колебаний векторов поля от нулевого значения до значения  $KZ = K\Delta$  внутри экрана. Таким образом, вектора поля  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  изменяют свою величину не только по величине, но и по фазе. Этот же вывод следует и из анализа коэффициента экранирования для плоского экрана.

$$\tilde{S} = \frac{H_i}{H_0} = \frac{1}{\operatorname{ch} \rho \Delta + \frac{m}{2} \operatorname{sh} \rho \Delta} \quad (9)$$

Этот коэффициент имеет комплексный характер,  $D$  - расстояние между поверхностями экрана. Здесь  $m = \frac{\rho D}{\mu}$ . Выделяя из выражения (9) модуль и аргумент, находят меру ослабления величины поля и изменение фазы для любой точки внутри экрана (см. прил. 5. I).

Цилиндрический экран в однородном внешнем гармоническом поле (рис. 4) имеет коэффициент экранирования, зависящий от тех же параметров  $\omega$ ,  $\mu_0$ ,  $\delta$ ,  $\Delta$ , но к ним добавляется еще геометрический параметр - внешний радиус цилиндра  $Z_2$ :

$$\tilde{S}_1 = \frac{1}{\operatorname{ch} \rho_1 \Delta + \frac{1}{2} \left( m_1 + \frac{1}{m_1} \right) \operatorname{sh} \rho_1 \Delta}, \quad (10)$$

где  $m_1 = \rho Z_2 / \mu$ ,  $\rho_1 = \sqrt{\rho^2 + 1/Z_2^2}$ .

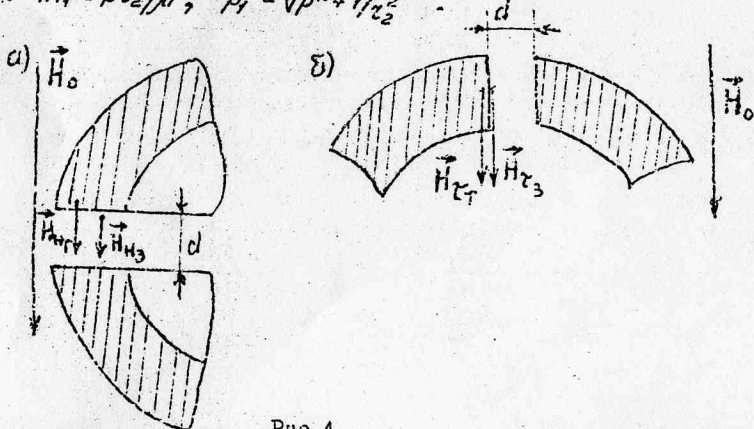


Рис. 4

Из анализа выражения (10) следует:

при однородном внешнем поле поле внутри экрана также однородно и совпадает по направлению с внешним, так как коэффици-

ент экранирования не зависит от координат точек внутри экрана;

поле внутри экрана сдвинуто по фазе относительно внешнего поля, так как  $\tilde{S}$  — комплексное число, определяемое комплексными параметрами  $\rho_1$  и  $m_1$ ;

с ростом частоты экранирование усиливается, что находит отражение в увеличении  $\rho$ , а следовательно, и  $ch\rho_1\Delta$ ,  $sh\rho_1\Delta$  и  $m_1$ ;

при уменьшении частоты ( $\omega \rightarrow 0$ ) и  $\mu = 1$  для выражения (10) имеем:  $\rho = 0$ ;  $\rho_1 = 1/2z_2$ ;  $ch\rho_1\Delta \approx 1$ ;  $sh\rho_1\Delta \approx \Delta/2z_2$ , что дает значение  $\tilde{S} = 1/e^{\Delta/2z_2} = 1$ .

Таким образом, постоянное поле внутри неферромагнитного экрана не ослабляется и совпадает с внешним полем;

для ферромагнитного экрана при низкой частоте  $\omega \rightarrow 0$  ( $\mu \gg 1$ ,  $m_1 = \frac{\mu}{\rho}$ ) в соответствии с выражением (10) получим  $\tilde{S} = 1 + \mu(\Delta/2z_2)$ , что совпадает с выражением (3) для магнито-статического экранирования.

Таким образом, при низкой частоте экранирующее действие определяется прохождением магнитного потока в толще экрана как при магнито-статическом экранировании. С ростом частоты начинает проявляться электромагнитное экранирование, которое при  $|P|R \gg 1$  полностью определяет свойство экрана.

Сферический экран. По аналогии с цилиндрическим экраном можно получить коэффициент экранирования сферического экрана в виде

$$\tilde{S}_2 = \frac{1}{ch\rho_1\Delta + \frac{1}{3}\left(m + \frac{2}{m}\right)sh\rho_1\Delta}, \quad (11)$$

где  $m = \frac{\rho z_2}{\mu}$ ,  $z_2$  — внешний радиус стенки экрана.

Для сферического экрана характерны те же явления, что и для цилиндрического экрана. Например, при  $\omega \rightarrow 0$  и  $\mu \gg 1$  имеем  $\tilde{S} = 1 + \frac{2}{3}\mu \frac{\Delta}{z_2}$ , что совпадает с выражением (4). В этом случае коэффициент  $\tilde{S}$  оказывается несколько большим, чем для цилиндрического экрана, при той же толщине стенок и радиусе  $z_2$ .

При увеличении радиуса кривизны поверхности цилиндрического или сферического экранов  $z_2 \rightarrow \infty$  формулы (10) и (11) переходят в формулу (9) для центральной точки плоского экрана.

### 1.3. Влияние стыков на эффект экранирования

В технике экран выполняется из отдельных элементов, так что в его стенках всегда имеются зазоры. Рассмотрим, как положение зазора относительно внешнего поля влияет на ослабление поля на экране.

#### Магнитостатическое экранирование при расположении зазора перпендикулярно внешнему полю

В этом случае (рис.4,а) в стенках экрана появляется большое добавочное магнитное сопротивление на пути магнитного потока, что приводит к увеличению магнитного потока внутри экрана и увеличению коэффициента экранирования. Используя граничное условие для нормальных составляющих вектора  $\vec{B}$  на границе раздела сред, имеем в зазоре  $\vec{B}_{нт} = \vec{B}_{из}$  или  $\vec{H}_{из} = \mu \vec{H}_{нт}$ .

Из этого выражения следует, что если отношение ширины зазора  $d$  к толщине экрана  $\Delta$  достаточно велико, то значительная доля поля внутри экрана будет иметь большую напряженность.

#### Магнитостатическое экранирование при расположении зазора параллельно внешнему полю

Этот случай приведен на рис.4,б, который показывает, что тангенциальные составляющие вектора напряженности  $\vec{H}_T$  на границе раздела сред равны, т.е. имеем  $\vec{H}_{из} = \vec{H}_{нт}$ . Зазор ведет себя как эквивалентное продолжение экрана. Именно для этого случая следует сопоставлять экспериментальные результаты определения коэффициента экранирования с теоретическими значениями, найденными (по выражениям (I0) и (II) соответственно для цилиндрического и сферического экранов.

#### Электромагнитное экранирование при расположении зазора перпендикулярно внешнему полю

Поведение вектора Пойнтинга  $\vec{\Pi}$ , характеризующего величину и направление движения электромагнитной энергии, приведено на рис.5. Из рис.5,а следует, что линии плотности тока проводимости  $\vec{j}$  касательны к краям зазора. Вектор напряжен-



ности электрического поля  $\vec{E}$  одинаков в зазоре и в экране, т.е.  $\vec{E}_{\tau\tau} = \vec{E}_{\tau\delta}$ . Отсюда  $\vec{H}_{\tau\delta} = \mu \vec{H}_{\tau\tau}$ .

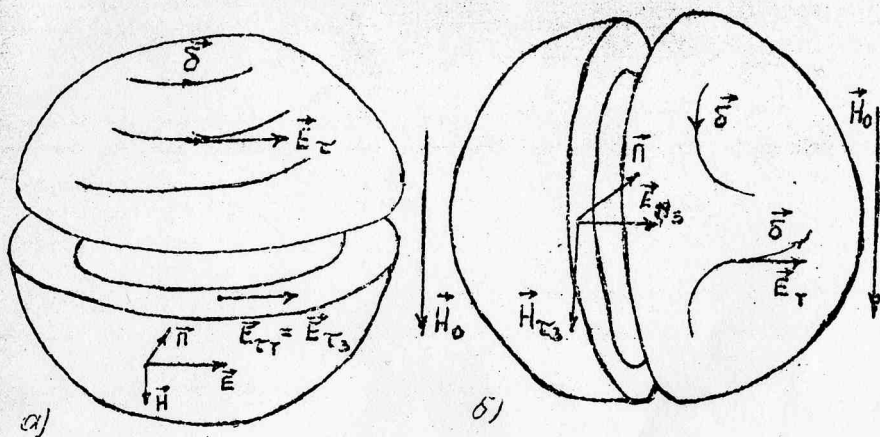


Рис.5

Из этого выражения следует, что для ферромагнитных материалов напряженность магнитного поля в зазоре в  $\mu$  раз больше напряженности поля в теле экрана  $\vec{H}_{\tau\tau}$ . Величина вектора Пойнтинга  $\vec{P}$  в зазоре во много раз больше, чем на поверхности экрана. Можно считать, что поток электромагнитной энергии внутрь экрана пропорционален ширине зазора.

Электромагнитное экранирование при расположении зазора параллельно внешнему полю (рис.5,6)

В этом случае напряженность магнитного поля  $\vec{H}$  одинакова в зазоре и в стенках экрана:  $\vec{H}_{\tau\delta} = \vec{H}_{\tau\tau}$ , так как касательные составляющие напряженности на границе раздела равны, а нормальные составляющие отсутствуют. Напряженность электромагнитного поля в зазоре  $\vec{E}$  оказывается во много раз больше, чем в стенках экрана  $\vec{E}_{\tau\tau}$ . Действительно, используя граничное условие для квазистационарных полей на границе раздела проводник - диэлектрик [3], получим:

$$\gamma_1 E_{\tau 1} + \epsilon_1 \epsilon_0 \frac{\partial E_{n1}}{\partial t} = \gamma_2 E_{n2} + \epsilon_2 \epsilon_0 \frac{\partial E_{n2}}{\partial t}.$$

Записав это выражение для гармонического режима

$$(\delta_1 + j\omega\epsilon_0\epsilon_1)E_{H1} = (\delta_2 + j\omega\epsilon_0\epsilon_2)E_{H2}$$

и приняв  $\delta_1 = \delta_2 = 10$ ,  $\epsilon_1 = 1 + 10$ ,  $\delta_2 = 0$ ,  $\epsilon_2 = 1$ ,  $E_{H1} = E_{H2}$ ,  $E_{H2} = E_{H3}$ ,

получим соотношение для длин векторов

$$E_{H3} = \frac{\sqrt{\delta_1^2 + (\omega\epsilon_0\epsilon_1)^2}}{\omega\epsilon_0} E_{H1} \approx \frac{\delta_1}{\omega\epsilon_0} E_{H1}.$$

Из этого выражения следует, что для диапазона радиочастот  $\delta_1/\omega\epsilon_0$ . Поток энергии, поступающей с поверхности зазора  $S = dL$ , оказывается не зависящим от ширины зазора  $d$ . Поэтому даже через узкий зазор будет поступать внутрь экрана значительная энергия, и эффект экранирования для экранов из ферромагнитных материалов получается ничтожно малым, а для экранов из ферромагнитного материала экранирование обусловлено только намагничиванием его стенок.

## 2. Описание измерительной установки

Однородное внешнее магнитное поле создается при помощи колец Гельмгольца (рис.6), где  $z_0 = 90$  мм - средний радиус двух катушек, расположенных друг от друга на расстоянии  $d = z_0$ . Число витков катушки  $W = 240$ . Если по катушкам пропустить постоянный ток  $I$  от источника питания ИИ, то между катушками возникнет магнитное поле напряженностью

$$H_0 = K_K I, \quad (12)$$

где  $K_K = 0,716 \frac{W}{z_0}$  - постоянная катушек Гельмгольца,  $1/м$ . Измерить величину напряженности магнитного поля можно помещением измерительной катушки в поле, создаваемое кольцами Гельмгольца.

Напряженность поля  $H_0$  связана с величиной измеряемого веберметра магнитного потока  $\psi$  соотношением

$$H_0 = \frac{\psi}{W_1 S \mu_0} = \frac{\psi}{K_S}, \quad (13)$$

где  $W_1 = 900$  - число витков измерительной катушки;  
 $S = 7,59 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  - среднее значение поверхности, охватываемое витками измерительной катушки;

$K_S = W_1 S \mu_0$  - постоянная измерительной катушки.

При исследовании электромагнитного экранирования схема рис.6 изменяется: кольца Гельмгольца подключаются к источни-

ку питания переменного тока, а измерительная катушка — к входу вольтметра, измеряющего действующее напряжение  $U$  на катушке. Напряженность магнитного поля  $H_{m0}$  связана с величиной действующего напряжения на катушке выражением

$$H_{m0} = \frac{U}{4,44 f K_B}, \quad (I4)$$

где  $f$  — частота напряжения источника питания.

При исследовании экранирующего действия измерительные катушки помещаются внутрь экранов и измеряется напряженность  $H_i$  внутри экранов.

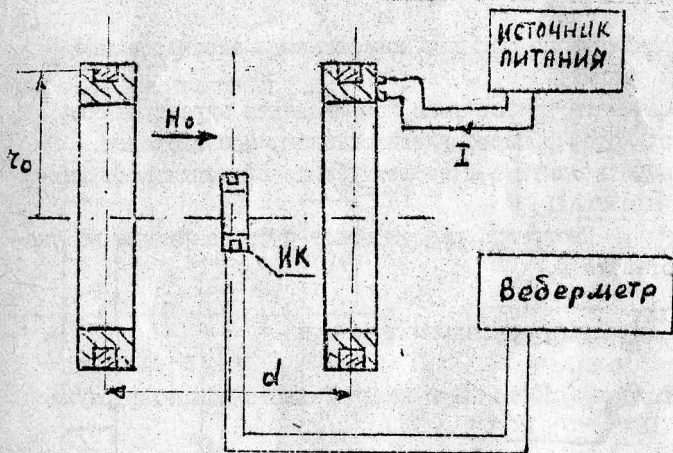


Рис.6

### 3. Программа работы

3.1. Определить постоянную колец Гельмгольца  $K_K$  по формуле (I2).

3.2. Определить постоянную измерительной катушки  $K_B$  расчетным (по формуле (I2)) и опытным путями.

3.3. Исследовать эффект ослабления постоянного поля  $H_0$  в экранах цилиндрической формы.

3.4. Исследовать эффект ослабления постоянного поля  $H_0$  для экранов сферической формы в зависимости от:

толщины стенок стальных и латунных экранов,

положения щели относительно направления вектора  $\vec{H}_0$  внеш-

него поля: параллельно (II) или перпендикулярно (I) ему.

3.5. Исследовать экранирующее действие экранов цилиндрической формы в переменном электромагнитном поле для диапазона частот  $f = 50 \dots 2000$  Гц.

3.6. Исследовать экранирующее действие экранов сферической формы в переменном электромагнитном поле для диапазона частот  $f = 50 \dots 2000$  Гц в зависимости от:

толщины стенок стальных и латунных экранов;

положения щели относительно направления комплексного вектора  $\vec{H}_0$  внешнего поля: параллельно (II) или перпендикулярно (I) ему.

3.7. Рассчитать по формуле коэффициенты экранирования для опытных данных.

3.8. Рассчитать по формулам коэффициенты экранирования для экранов, которые подверглись опытному исследованию.

3.9. Сравнить опытные и теоретические значения коэффициентов экранирования.

Примечание. Программа работы может быть сокращена по указанию преподавателя.

#### 4. Порядок выполнения работы

4.1. Определить постоянную колец Гельмгольца по формуле

$$K_k = 0,716 \frac{W}{z_0}.$$

4.2. Определить постоянную измерительной катушки по формуле  $K_s = W_i S \mu_0$  и опытным путем, придерживаясь определенной последовательности.

Собрать схему рис.7. Измерительная катушка подключается к цифровому веберметру типа Ф 5050 (либо к аналоговому веберметру типа Ф 190П). Ток в кольцах Гельмгольца, который задан от источника питания типа ЛИПС II-10, измеряется амперметром А.

Измерение постоянной измерительной катушки:

1) установить ток в кольцах Гельмгольца  $I = 0,06$  А;

2) измерительную катушку подключить к входным зажимам прибора Ф 5050 и поместить в центр колец так, чтобы ось измерительной катушки совпала  $Z_n$  с осью колец Гельмгольца, т.е. с направлением внешнего поля  $\vec{H}_0$ ;

- 3) включая одновременно питание источника и ручку "Пуск" на веберметре, определить показания веберметра  $\Psi_i$ ;
- 4) результаты измерений занести в ф.1;
- 5) вычислить постоянную измерительной катушки по выражению

$$K'_\delta = \frac{\Psi_i \tau_0}{0,716 I W} ;$$

- 6) сравнить полученные результаты со значением  $K_\delta$ , указанным на стенке к работе.

При точно настроенной измерительной системе  $K_\delta = K'_\delta$ . Все измерительные катушки выполнены с одинаковым значением  $K_\delta$ .

Примечание. Порядок работы с приборами Ф 5050 подробно описан в приложении п.3.1.

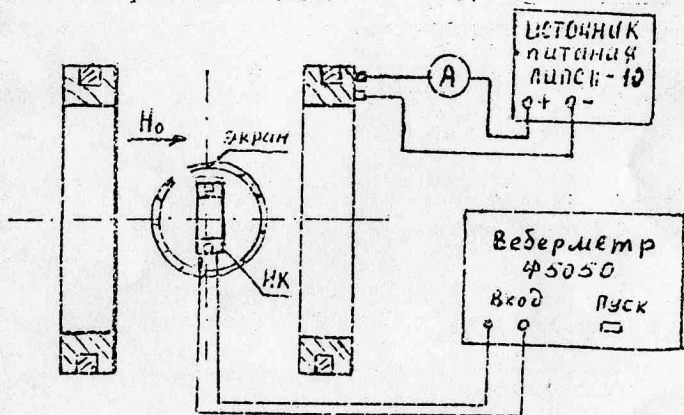


Рис.7

Форма I

Исследование магнитоэлектрического экранирования  
в цилиндре

Исходные параметры			Наблюдения		Вычисления		
Материалы	Толщина стенок $\Delta$	Радиус экрана $r_e$	I	$\Psi_i$	$S_1$	$S_T$	$\delta = \left(1 - \frac{S_1}{S_T}\right) \cdot 100\%$
	мм	мм	А	мк В <sub>0</sub>	-	-	-
Сталь	1,5	24,5					
	3,0	20,0					
Медь	3,0	28					
Алюминий	3,0	28					

4.3. Исследовать эффект ослабления постоянного поля в экранах цилиндрической формы:

- 1) установить в катушках Гельмгольца ток  $I = 0,06$  А;
- 2) подключив к веберметру измерительную катушку, расположить ее в цилиндрическом экране и поместить в центр колец;
- 3) включить (или выключить) одновременно источник питания и ручку "Тюк" на веберметре, определить показания веберметра  $\Psi_i$ ;
- 4) занести показания веберметра в ф.И;
- 5) повторить опыт с остальными экранами;
- 6) определить напряженность магнитного поля внутри экрана по выражению

$$H_i = K_S^{-1} \Psi_i;$$

7) результаты вычислений занести в ф.И.

Вычислить опытное значение коэффициента экранирования

$$S_{\text{опт}} = \frac{H_i}{H_0} = \frac{\Psi_i}{K_K K_S I} \quad (9)$$

и теоретическое значение коэффициента экранирования

$$S_1 = \frac{1}{1 + \mu \frac{\Delta}{z_2}}, \quad (10)$$

где  $\Delta$  и  $z_2$  - параметры экранов указаны в ф.И.

Форма 2

### Исследование магнитоэстатического экранирования в сфере

Материал	Наблюдения $\Psi_i$ при зазоре, расположенном		I	Вычисления		
	параллельно $H_0$	перпендикулярно $H_0$		$S_2$	$S_T$	$\delta = \frac{S_2 - S_T}{S_T} \cdot 100\%$
Сталь						
$\Delta = 5$ мм, $z_2 = 32$ мм						
$\Delta = 3$ мм $z_2 = 30$ мм						
Латунь						
$\Delta = 5$ мм $z_2 = 32$ мм						
Алюминий						
$\Delta = 5$ мм $z_2 = 32$ мм						

## Исследование электромагнитного экранирования

Материал	Частота $f$ , Гц	Напряжение на ИК		Фаза $\varphi$	Вычисления			
		$U_0$	$U_L$		$ S_{оп.} $	$ S_r $	$\varphi_r$	$\delta = \frac{S_r - S_{оп.}}{S_r} \cdot 100\%$
Алюминий  $A = 5$ мм $Z_k = 28$ мм	50							
	100							
	200							
	300							
	500							
	1000							
	1500							
	2000							

4.4. Исследовать эффект ослабления постоянного поля для экранов сферической формы:

1) установить ток в кольцах Гельмгольца  $I = 0,06$  А;  
 2) измерительную катушку, расположенную в сфере, подключить к выходу прибора  $\Phi 5050$  и поместить в центр колец так, чтобы ось измерительной катушки совпадала с осью колец Гельмгольца, щель параллельно ему;

3) включить (или выключить) одновременно питание источника и ручку "Пуск" на веберметре, определить показания веберметра  $\psi_i$ ;

4) подключить к веберметру измерительную катушку, расположенную в сферическом экране, и поместить в центр колец перпендикулярно напряженности поля и включить одновременно источник питания и ручку "Пуск" на веберметре, определить показания веберметра для перпендикулярного положения щели относительно напряженности  $H_0$ ;

5) занести показания веберметра в  $\Phi.2$ .

Определить напряженность внутри сферических экранов по выражению  $H_i = K_8 \psi_i$ .

Результаты вычислений занести в  $\Phi.2$ .

Вычислить опытное значение коэффициента экранирования

$$S_{оп.} = \frac{H_i}{H_0} = \frac{\psi_i}{K_k K_s I} \quad \text{и теоретическое значение коэффи-}$$

коэффициента экранирования  $S_2 = \frac{1}{1 + (2/3)\mu(\Delta/z_2)}$ ,  
 где  $\Delta$  и  $z_2$  - параметры экранов, указаны в п. 2.

4.5. Исследовать экранирующее действие экранов цилиндрической формы в переменном электромагнитном поле:

собрать схему (рис. 8). Кольца Гельмгольца подключить к усилителю мощности типа ТООУ - Ю1. Амперметр включить последовательно с катушкой. Усилитель мощности подключить к выходу генератора типа ГЗ-Ю2. Измерительную катушку подключить к милливольтметру типа ВЗ-38. Осциллограф типа С 1-69 подключить к выходу усилителя типа ТООУ-Ю1 и к измерительной катушке.

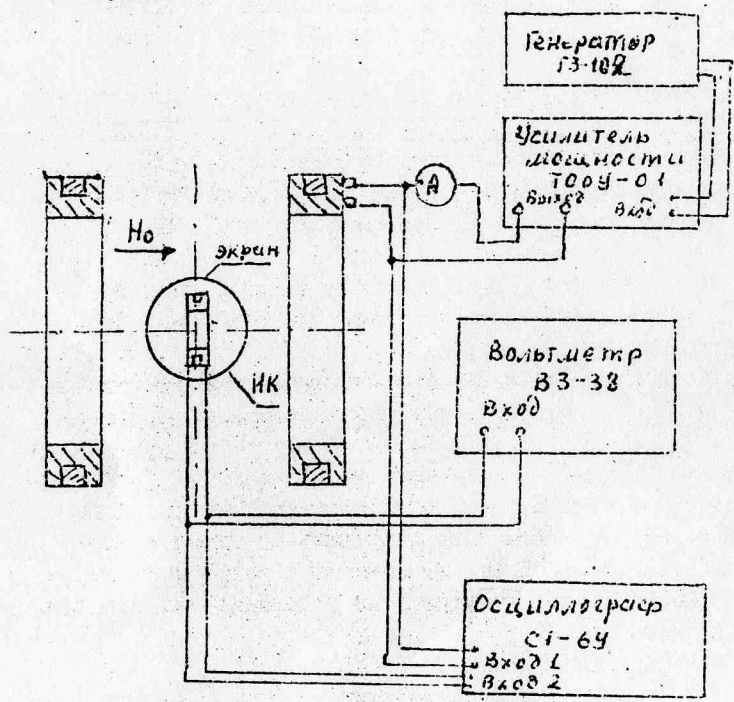


Рис. 8

Порядок измерения напряженности поля колец Гельмгольца:

- 1) измерительная катушка помещается в центр колец так, чтобы ось измерительной катушки совпала с осью колец;



2) на генератор установить частоту, указанную в ф.3, и уровень выходного сигнала в пределах 5...10 В;

3) измерить и записать в ф.3 показания вольтметра  $U_0$  для ряда частот, указанных в ф.3;

4) по выражению  $H_{m0i} = \frac{U_0}{4,44 f K_s}$  вычислить напряженность внешнего магнитного поля;

5) записать результаты вычислений в таблицу.

Порядок исследования электромагнитного экранирования в цилиндре:

1) подключить к вольтметру типа ВЗ-38 измерительную катушку, находящуюся в алюминиевом цилиндрическом экране, поместить его в центр колец так, чтобы ось катушки расположилась параллельно оси колец;

2) изменяя частоту генератора согласно данным ф.3, измерить напряжение  $U_i$  на измерительной катушке и по осциллографу измерить угол сдвига фаз между напряженностью  $H_0$  и  $H_i$ ;

3) результаты измерения занести в ф.3;

4) повторить эксперимент для других цилиндрических экранов;

5) результаты наблюдений занести в ф.3.

Вычислить опытное значение модуля коэффициента экранирования по выражению  $|S_{on}| = H_{mi}/H_{m0i} = U_i/U_0$ .

Вычислить модуль коэффициента экранирования и угол сдвига фаз для различных частот по программе I, приведенной в прил.5.1, на калькуляторе "Электроника-БЗ-34", по выражению

$$\tilde{S}_{ii} = \frac{1}{\frac{e^{K\Delta} \cos K\Delta}{2} + \frac{z_2 K e^{K\Delta}}{4\mu} (\cos K\Delta + \sin K\Delta) + j \left[ \frac{z_2 K e^{K\Delta}}{4\mu} (\cos K\Delta - \sin K\Delta) + \frac{e^{K\Delta}}{2} \sin K\Delta \right]} = \frac{1}{A + jB} = |S_i| e^{j\varphi_i},$$

где  $\varphi_i = -\operatorname{arctg} \frac{B}{A}$  - угол сдвига фаз между напряженностями полей;  $|S_i|$  - модуль коэффициента экранирования для цилиндрического экрана;  $K = \sqrt{\frac{\omega \mu \epsilon}{2}}$ .

Построить график зависимости модуля коэффициента экранирования  $|S_{on}|$  и  $|S_T|$  и сдвига фаз от частоты.

4.6. Исследовать экранирующее действие экранов сферической

формы в переменном электромагнитном поле:

1) подключить к вольтметру типа БВ-38 измерительную катушку, находящуюся в сферическом алюминиевом экране, поместить его в центр колец так, чтобы ось катушки совпала по направлению с осью колец Гельмгольца;

2) изменяя частоту генератора согласно ф.3, измерить напряжение  $U_i$  на измерительной катушке и угол сдвига фаз (см. лаб. раб.4);

3) результаты измерения занести в ф.3;

4) повторить эксперимент для других сферических экранов, располагая зазор параллельно и перпендикулярно напряженности магнитного поля  $H_0$ ;

5) результаты измерений занести в ф.3.

Вычислить оштное значение модуля коэффициента экранирования по выражению  $|S_{\text{ш}}| = H_{\text{ш}} / H_{\text{ш0}} = U_i / U_0$ , где  $H = U_i / 4,44 k \omega$   
 $H_{\text{ш0}}$  - значение напряженности определенное в п.2.

Вычислить модуль коэффициента экранирования и угол сдвига фаз для различных частот по программе 2, приведенной в прил.5.1 на калькуляторе "Электроника БВ-34" по выражению

$$\tilde{S}_{2i} = \frac{1}{\text{ch} p_1 \Delta + \frac{1}{3}(m + \frac{2}{m}) \text{Sh} p_1 \Delta} = \frac{1}{c + jD} = |S_2| e^{j\varphi_2},$$

где  $\varphi_2 = \arctg \frac{D}{c}$  - угол сдвига фаз между напряженностями полей,  $|S_2|$  - модуль коэффициента экранирования для сферического экрана.

Результаты расчета занести в ф.3.

Построить график зависимости модуля коэффициента экранирования и угла сдвига фаз от частоты.

## 5. Содержание отчета

1. Схемы измерений и спецификация приборов.
2. Таблицы результатов измерений и вычислений.
3. Графики результатов вычислений.
4. Выводы по работе.

## 6. Контрольные вопросы

1. Экранируют ли медные экраны в постоянном магнитном поле?

2. Экранирует ли медные экраны в переменном магнитном поле?
  3. Какое экранирование (магнитное или электромагнитное) более совершенно?
  4. Как влияет на коэффициент экранирования расположение зазора при магнитоэстатическом экранировании?
  5. Как влияет расположение зазора на коэффициент экранирования при электромагнитном экранировании?
  6. Что понимают под термином коэффициент экранирования?
  7. Что такое длина волны?
  8. Как зависит электромагнитное экранирование от ширины зазора?
  9. Что означает комплексный характер коэффициента экранирования?
  10. Может ли поле в экране быть больше, чем внешнее поле?
- II. Какое направление имеет вектор Пойтинга в цилиндрическом и сферическом экранах на поверхности экрана?

### Литература

1. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. В 2-х томах. Т.2. - Л.: Энергия, 1981.
2. Каплятский А.Е., Лисенко А.П., Полотовский Л.С. Теоретические основы электротехники. - М.: Высшая школа, 1972.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. - М.: Высшая школа, 1973.