

Отчет по лабораторной работе №4

Электромагнитное экранирование

Работу выполнили студенты
430 группы радиофизического факультата
Сарафанов Ф.Г., Платонова М.В.

Нижний Новгород, 23 февраля 2019 г.

Содержание

Введение	2
1. Цели работы	3
2. Элементы теории	3
2.1. Основные понятия	3
2.2. Расчет экранирующего действия металлических оболочек	3
3. Описание экспериментальной установки	5
4. Практическая часть	6
4.1. Задания 1,2	6
4.2. Задание 3	7
5. Вывод	7

Введение

В данной работе изучаются с помощью матричного анализа волноводные узлы – шестиполюсники. У них с помощью измерительной линии измеряются величины, позволяющие рассчитать коэффициенты матрицы рассеяния шестиполюсников S_{kt} .

На основе рассчитанной матрицы рассеяния S конкретного шестиполюсников можно попытаться решить обратную задачу: сделать на основе полученных данных предположение о возможных конструктивных вариантах волноводных узлов, находящихся внутри шестиполюсников.

1. Цели работы

Настоящая работа преследует следующие две основные цели.

- Экспериментальное наблюдение явления экранирования переменного магнитного поля металлическими оболочками и выяснение роли основных физических факторов, определяющих степень проникновения поля через экран; к числу таких факторов относятся: свойства материала экрана (проводимость и магнитная проницаемость), толщина его стенок, частота поля.
- Теоретический расчет экранирующих свойств металлических оболочек на простой модели и сопоставление экспериментальных и теоретических данных.

2. Элементы теории

2.1. Основные понятия

Под электромагнитным экранированием понимается изоляция некоторой области пространства от проникновения электромагнитных полей, существующих в соседних областях. В статических или переменных квазистационарных полях (которым соответствуют длины волн, много большие характерных размеров используемых приборов и устройств) такая изоляция осуществляется обычно с помощью замкнутых металлических оболочек - экранов. Явление экранирования поля проводящими оболочками имеет большое практическое значение. В частности, оно широко используется в электро- и радиотехнике для уменьшения паразитных связей между различными элементами приборов. В некоторых случаях, напротив, может возникнуть необходимость принимать специальные меры для борьбы с этим явлением. Общей физической причиной ослабления поля внутри экрана является то обстоятельство, что наведенные в нем внешним полем токи (или заряды) создают во внутренней области поле, противоположное внешнему. В результате суммарное поле в этой области, складывающееся из полей внешних и наведенных источников, уменьшается.

2.2. Расчет экранирующего действия металлических оболочек

В качестве экранов в работе используются оболочки цилиндрической формы. Строгий расчет их экранирующего действия представлял бы собой весьма сложную задачу, требующую использования численных методов. Однако для получения качественных оценок, ослабления поля в экранированной области и установления общего характера его зависимости от параметров можно ограничиться изучением более простых моделей, допускающих точное решение задачи в известных аналитических функциях. Моделями такого рода

являются, например, плоский, цилиндрический и сферический слои. Поскольку высота и диаметр внутренней полости используемых в работе цилиндров одинаковы и весьма малы по сравнению с длиной волны в свободном пространстве λ_0 , наиболее адекватной моделью, по-видимому, следует считать сферический слой, который имеет тот же объем внутренней полости и внешний радиус $a \ll \lambda_0$. Последнее условие означает, что вне металла (т.е. как во внешней, так и в экранируемой областях) поле можно рассматривать как квазистатическое. Если замкнутая однородная сферическая оболочка помещена в квазистатическое внешнее поле с комплексным вектором напряженности $\vec{H}_0 e^{i\omega t}$, которое в ее отсутствие является однородным, то поле в ограничиваемой ею области $\vec{H}_1 e^{i\omega t}$ также однородно. Эффективность экранирования удобно характеризовать величиной отношения комплексных амплитуд этих полей:

$$\eta_m = H_0/H_1 \quad (1)$$

Величина $|\eta_m|$ показывает, в какое число раз ослабляется поле в экранированной области, и может быть названа коэффициентом ослабления. Она, естественно, сильно зависит от соотношения между толщиной экрана d и толщиной скин-слоя $\delta = c/(2\pi\sigma\mu\omega)^{1/2}$ (c - скорость света в вакууме, σ - проводимость, μ - магнитная проницаемость экрана). В двух предельных случаях ($\delta \ll d$ и $\delta \gg d$) выражение для η_m (в общем случае довольно громоздкое) существенно упрощается и при выполнении дополнительного условия $d \ll a$ принимает следующий вид:

1) $\delta \ll d$ (сильный скин-эффект):

$$\eta_m = \frac{1}{6} \left[(1-i) \frac{\mu\delta}{a} + 3 + (1+i) \frac{a}{\mu\delta} \right] \exp \left[(1+i) \frac{d}{\delta} \right] \quad (2)$$

При $\mu = 1$

$$\eta_m = \frac{1}{6} (1+i) \frac{a}{\delta} \exp \left[(1+i) \frac{d}{\delta} \right] \quad (3)$$

2) $\delta \gg d$ (скин-эффект отсутствует):

$$\eta_m = 1 + \frac{2}{3} \frac{d}{a} \frac{(\mu-1)^2}{\mu} + i \frac{2}{3} \frac{ad}{\mu\delta^2} \quad (4)$$

При $\mu = 1$

$$\eta_m = 1 + i \frac{2ad}{3\delta^2} \quad (5)$$

Для приближенных оценок величины η_m (с точностью $\sim 10\%$) выражения (2)–(5) можно использовать и в промежуточном случае ($\delta \simeq d$), разграничивая области применимости формул (2), (3), с одной стороны, и (4), (5), с другой стороны, точкой $\delta = d$.

Заметим, что приведенные результаты расчета позволяют описать также экранирующее действие сферической металлической оболочки по отношению к переменному электрическому полю. В частности, при $\delta \gg a$ выражение для комплексного коэффициента

ослабления электрического поля η_ε , легко получается на основании принципа перестановочной двойственности из выражения (4) путем замены в нем магнитной проницаемости μ на диэлектрическую проницаемость проводника $\varepsilon = 4\pi\sigma/i\omega$. В диапазоне радиочастот величина $|\varepsilon|$ для хороших проводников и определяемая ею величина $|\eta_\varepsilon|$ принимают чрезвычайно высокие значения, недоступные для измерений в условиях настоящей работы даже при весьма малой толщине экранов. Например, при $d/a \simeq 10^{-3}$, $\sigma \simeq 10^{17} \text{с}^{-1}$, $\omega \simeq 10^4 \text{с}^{-1}$, пренебрегая в (4) малыми членами и заменяя μ на ε , получаем:

$$\eta_\varepsilon = 2\varepsilon d/3a = -i8\pi\sigma d/3\omega a \simeq -i \cdot 10^{11} \quad (6)$$

В полном соответствии с законами электростатики при $\omega \rightarrow 0$ величина $\eta_\varepsilon \rightarrow \infty$, т.е. электрическое поле внутрь экрана не проникает.

3. Описание экспериментальной установки

Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Лабораторная установка предусматривает проведение измерений коэффициентов ослабления для трех латунных и трех стальных экранов цилиндрической формы. Внутренние размеры всех цилиндров одинаковы (высота $h = 50 \text{мм}$, диаметр основания $D = 50 \text{мм}$), а толщина стенок различна (2мм, 5мм, 10мм). Значения проводимости σ и магнитной проницаемости μ латуни и стали приведены ниже (в гауссовой системе единиц). Латунь: $\sigma \simeq 1.5 \cdot 10^{17} \text{с}^{-1}$, $\mu \cong 1$. Сталь: $\sigma \simeq 0.7 \cdot 10^{17} \text{с}^{-1}$, $\mu \sim 10^2 \div 10^3$ (при $H \sim 10$ эрстед). Схема измерения коэффициента ослабления магнитного поля изображена на рисунке 1. Переменное магнитное поле создается внутри соленоида, подключенного к выходу звукового генератора. В качестве индикатора поля используется второй соленоид (меньших размеров), с выхода которого переменное напряжение может подаваться на усилитель вольтметра. Надевая больший (генераторный) соленоид сначала на открытый (неэкранированный) индикатор, а затем на индикатор, закрываемый экраном, и измеряя, как изменяются при этом показания вольтметра, мы могли бы (при неизменности амплитуды тока в цепи внешнего соленоида) определить тем самым коэффициент ослабления $|\eta_\mu|$. Поскольку, однако, внесение металлического экрана внутрь внешнего соленоида, вообще говоря, изменяет его коэффициент самоиндукции, а следовательно, и его импеданс, сила тока в цепи внешнего соленоида и создаваемое этим током магнитное поле H_0 при наличии экрана и в его отсутствие могут быть различными. Это необходимо учитывать при определении величины $|\eta_\mu|$. В используемой схеме предусмотрено измерение относительных изменений токов как во внутреннем, так и во внешнем соленоидах. С этой целью в цепь внешнего соленоида введено сопротивление R , напряжение с которого подается на

вертикальный усилитель осциллографа. Величина $|\eta_\mu|$ должна определяться по формуле:

$$|\eta_\mu| = \frac{V_0 U_e}{V_e U_0} \quad (7)$$

где V и U - соответственно показания вольтметра и осциллографа, индексы 0 и e относятся соответственно к величинам измеренным без экрана и с экраном.

4. Практическая часть

4.1. Задания 1,2

Для каждого экрана(латунь, сталь) сняли экспериментальную зависимость коэффициента ослабления магнитного поля $|\eta_\mu|$ от частоты f .

Таблица 1. Измерение экранирования латунными экранами

	Без экрана		Латунь 2			Латунь 5			Латунь 10		
f , Гц	V_0	U_0	V_e	U_e	$ \eta_m $	V_e	U_e	$ \eta_m $	V_e	U_e	$ \eta_m $
20	1 000	16.70	930	16.30	1.05	910.0	16.30	1.07	870.00	16.30	1.12
50	1 000	5.59	870	5.59	1.15	820.0	5.59	1.22	620.00	5.19	1.50
100	1 000	4.40	770	4.40	1.30	650.0	4.40	1.54	490.00	4.40	2.04
200	1 000	1.90	680	2.09	1.62	540.0	2.24	2.18	380.00	2.40	3.32
500	1 000	1.14	500	1.30	2.28	300.0	1.46	4.27	180.00	1.60	7.80
1 000	1 000	0.73	390	0.92	3.23	170.0	1.00	8.06	90.00	1.27	19.33
2 000	1 000	0.65	240	0.92	5.90	80.0	1.00	19.23	34.00	1.30	58.82
5 000	1 000	0.58	100	0.78	13.45	28.0	0.88	54.18	3.80	1.28	580.73
10 000	700	0.31	39	0.32	18.53	5.2	0.33	143.30	0.45	0.62	3 111.07

Таблица 2. Измерение экранирования стальными экранами

	Без экрана		Сталь 2			Сталь 5			Сталь 10		
f , Гц	V_0	U_0	V_e	U_e	$ \eta_m $	V_e	U_e	$ \eta_m $	V_e	U_e	$ \eta_m $
20	1 000	16.70	52.00	16.00	18	20.000	15.60	47	18.000	15.10	50
50	1 000	5.59	68.00	4.50	12	9.000	4.20	83	1.500	4.00	477
100	1 000	4.40	54.00	3.20	13	7.500	2.79	85	0.350	1.60	1 039
200	1 000	1.90	40.00	1.05	14	2.200	0.97	232	0.040	0.83	10 921
500	1 000	1.14	22.00	0.68	27	0.250	0.60	2 105	0.010	0.58	50 877
1 000	1 000	0.73	9.00	0.52	79	0.035	0.50	19 568	0.005	0.48	131 506
2 000	1 000	0.65	3.20	0.54	260	0.030	0.48	24 614	—	—	—
5 000	1 000	0.58	0.18	0.54	5 172	—	—	—	—	—	—
10 000	700	0.31	0.07	0.38	12 258	—	—	—	—	—	—

Принимая в качестве модели цилиндрического экрана сферический слой той же толщины d и с тем же объемом внутренней полости $V = (4\pi/3)(a-d)^3 = \pi R^2 h$ (отсюда, ввиду

$a \gg d$, имеем $a \cong (3R^2h/4)^{1/3}$, построили для исследуемых экранов графики теоретической зависимости $|\eta_\mu(f)|$.

Качественное совпадение наблюдается в области малых частот (до 1000 Hz). Для более высоких частот теория от эксперимента отличается в 20 порядков.

4.2. Задание 3

Используя результаты измерений для стальных экранов, рассчитали приблизительно на основании той же сферической модели для случая $\delta(f) \ll d$ (формула (2)) значения магнитной проницаемости стали μ . Способ приближенного расчета состоял в численном решении уравнения для 3 нижних частот (для высоких частот модель **не совпадает**) частот и последующем усреднении результатов. По полученным данным можно сделать

Таблица 3. Магнитная проницаемость μ для разных частот f и толщины экрана d

f , Hz	μ , 2mm	μ , 5mm	μ , 10mm
20	306.25	13.05	18.64
50	179.35	38.76	32.26
100	94.83	102.01	146.13
$\langle \mu \rangle$	193.48	51.27	65.68

вывод о недостаточной точности эксперимента. Хотя качественно μ для стали действительно лежит в пределах 100 – 1000.

5. Вывод

- 1) Экспериментально наблюдали явление экранирования переменного магнитного поля металлическими оболочками и выяснили роль основных физических факторов, определяющих степень проникновения поля через экран
- 2) Теоретически рассчитали экранирующие свойства металлических оболочек на простой модели и сопоставили экспериментальные и теоретические данные.
 - В области малых частот простая модель действительно хорошо описывает экранирующие свойства цилиндрического экрана. В области высоких частот теория модели отличается на несколько порядков, что говорит о неприменимости модели.
 - Для стали магнитная проницаемость варьируется в достаточно широких пределах. Это говорит о том, что необходимо повысить чувствительность эксперимента для более точного определения μ .