

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Утверждаю
директор ИШНКБ
_____ П.Ф. Баранов
«__» _____ 2023 г.

Лабораторная работа №9

Материалы для магнитных экранов

Методические указания по выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Материалы электронной техники» для студентов,
обучающихся
по направлениям: «Электроника и наноэлектроника» – 11.03.04 и
«Биомедицинская инженерия» – 2.12.03.04

УДК 621. 383.45

Методические указания по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Материалы электронной техники» для студентов, обучающихся по направлениям: «Электроника и наноэлектроника» – 11.03.04 и «Биомедицинская инженерия» – 2.12.03.04 – Томск изд. ТПУ, 2023. – 18 с.

УДК 621. 383.45

Методические указания рассмотрены и рекомендованы
к изданию методическим семинаром
Отделения электронной инженерии ИШНКБ 29 января 2023 г.

и.о. руководителя ОЭИ
к.т.н., доцент П.Ф. Баранов

Составитель: доцент, к.т.н. Коледа А.Н.

Рецензент: доцент, к.т.н. Иванова В.С.

© Составление. ГОУ ВПО НИ ТПУ 2023
© Коледа А.Н., составление, 2023
© Оформление. Издательство Томского 2023

1. Цель и задачи работы

1.1. Изучить физические принципы защиты приборов от влияния внешних магнитных полей.

1.2. Ознакомиться с характеристиками материалов и сплавов для магнитных экранов.

1.3. Экспериментальным путем определить области эффективного использования различных материалов магнитных экранов при частотах электромагнитного поля от 10^2 до 10^5 Гц.

1.4. Экспериментальным путем определить влияния толщины стенки экрана на эффективность экранирования.

1.5. Закрепить навыки работы с контрольно-измерительными приборами и аппаратурой для исследования и испытания измерительных приборов и устройств.

2. Защита приборов от влияния внешних магнитных полей

Принцип действия большинства преобразователей средств измерений основан на преобразовании электрической и магнитной энергий, поэтому электрические и магнитные поля, наводимые внутри средств измерений источниками, расположенными вблизи, искажают характер преобразования электрической и магнитной энергии в измерительном устройстве. Для защиты чувствительных элементов приборов от влияния внутренних и внешних электрических и магнитных полей применяют экранирование.

Под магнитным экранированием какой-либо области пространства понимается ослабление магнитного поля внутри этой области путем ограничения ее оболочкой, изготовленной из магнитомягких материалов. В практике также применяется другой способ экранирования, когда в оболочку помещают источник магнитного поля, ограничивая тем, самым распространение последнего в окружающую среду.

Основы экранирования базируются на теории распространения электрического и магнитного поля. Излучаемая энергия передается

электромагнитным полем. Когда поле изменяется во времени, его электрическая и магнитная составляющие существуют одновременно, причем одна из них может быть больше другой. Если больше электрическая составляющая, то поле считается электрическим, если больше магнитная составляющая, то поле считают магнитным. Обычно поле имеет ярко выраженный характер вблизи своего источника на расстоянии длины волны. В свободном пространстве, на большом расстоянии от источника энергии (сравнительно с длиной волны) обе составляющие поля имеют равное количество энергии. Кроме того, всякий проводник, расположенный в электромагнитном поле, обязательно поглощает и вновь излучает энергию, поэтому и на малых расстояниях от такого проводника относительное распределение энергии отличается от распределения энергии в свободном пространстве.

Электрическая (электростатическая) составляющая поля соответствует напряжению на проводнике, а магнитная (электромагнитная) – току. Определение необходимости той или иной степени экранирования данной электрической цепи, а так же, как и определение достаточности того или иного вида экрана, почти не поддается техническому расчету, потому что теоретические решения отдельных простейших задач оказываются неприемлемыми к сложным электрическим цепям, состоящим из произвольно расположенных в пространстве элементов, излучающих электромагнитную энергию в самых разнообразных направлениях. Для расчета экрана пришлось бы учитывать влияние всех этих отдельных излучений, что невозможно. Поэтому от конструктора, работающего в этой области, требуется ясное понимание физического действия каждой экранирующей детали, ее относительного значения в комплексе деталей экрана и умение выполнять ориентировочные расчеты эффективности экрана.

Эффективностью экранирования называется отношение напряжений, токов, напряженностей электрического и магнитного полей в экранируемого пространства при отсутствии и наличии экрана:

$$\mathcal{E} = \frac{U}{U'} \sim \frac{I}{I'} \sim \frac{E}{E'} \sim \frac{H}{H'} \quad (1)$$

По принципу действия различают электростатические, магнитостатические и электромагнитные экраны.

Экранирующее действие металлического экрана обуславливается двумя причинами: отражением поля от экрана и затуханием поля при прохождении сквозь металл. Каждое из этих явлений не зависит одно от другого и должно рассматриваться отдельно, хотя общий экранирующий эффект является результатом их обоих.

Электростатическое экранирование состоит в замыкании электрического поля на поверхности металлической массы экрана и передаче электрических зарядов на корпус устройства (рис 1.).

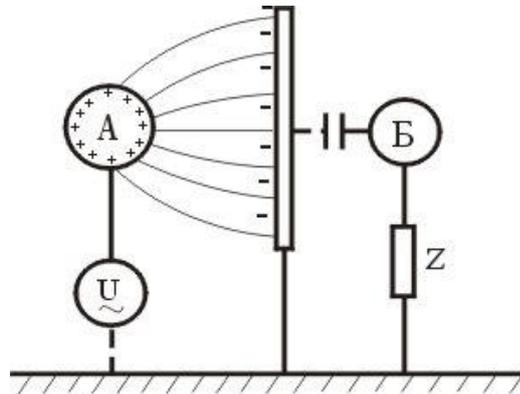


Рис1. Замыкание электрического поля через экран

Если между элементом конструкции А, создающим электрическое поле, и элементом В, для которого влияние этого поля вредно, поместить экран В, соединенный с корпусом (землей) изделия, то он будет перехватывать электрические силовые линии, защищая элемент В от вредного влияния элемента А. Следовательно, электрическое поле может быть надежно экранировано даже очень тонким слоем металла.

Индуктированные заряды располагаются на внешней поверхности экрана так, что электрическое поле внутри экрана равно нулю.

Магнитостатическое экранирование основано на замыкании магнитного поля в толщине экрана, имеющего повышенную магнитную проницаемость. Материал экрана должен обладать магнитной

проницаемостью значительно больше магнитной проницаемости окружающей среды. Принцип действия магнитоэкранирующего экрана показан на рис. 2.

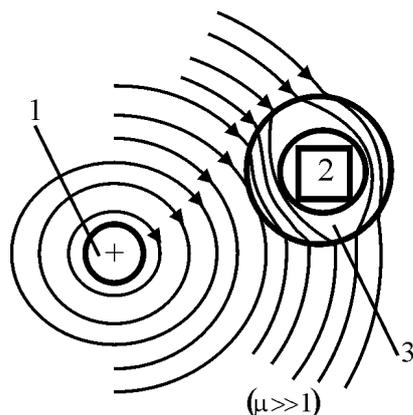


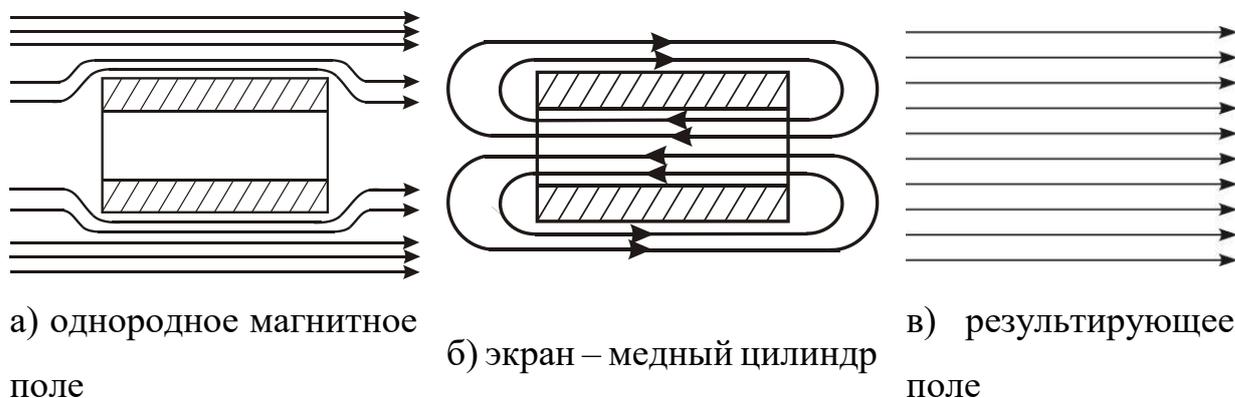
Рис.2. Принцип действия магнитоэкранирующего экрана.

1 – источник магнитного поля, 2 – экранируемая часть, 3 – экран

Магнитный поток, создаваемый элементом конструкции (в данном случае проводом), замыкается в стенках магнитного экрана вследствие его малого магнитного сопротивления. Эффективность такого экрана тем больше, чем больше его магнитная проницаемость и толщина.

Магнитоэкранирующий экран применяют только при постоянном поле или в диапазоне низких частот изменения последнего.

Электромагнитное экранирование основано на взаимодействии переменного магнитного поля с вихревыми токами, наведенными им в толще и на поверхности токопроводящего материала экрана. Принцип электромагнитного экранирования иллюстрирован на рис. 3.



а) однородное магнитное поле

б) экран – медный цилиндр

в) результирующее поле

Рис.3 Принцип действия электромагнитного экрана

Если на пути однородного магнитного потока поместить медный цилиндр (экран), то в нем возбуждятся переменные Э.Д.С., которые, в свою

очередь, создадут переменные индукционные вихревые токи. Магнитное поле этих токов будет замкнутым (рис 3б); внутри цилиндра оно будет направлено навстречу возбуждающему полю, а за его пределами – в ту же сторону, что и возбуждающее поле. Результирующее поле оказывается ослабленным (рис. 3в) внутри цилиндра и усиленным вне его, т.е. происходит вытеснение из пространства, занимаемого цилиндром, в чем и заключается его экранирующее действие.

Эффективность электромагнитного экранирования увеличивается с увеличением обратного поля, которое будет тем больше, чем больше протекающие по цилиндру вихревые токи, т.е. чем больше электрическая проводимость цилиндра. Ослабление магнитного поля металлом может быть вычислено. Оно пропорционально толщине экрана, коэффициенту вихревых токов и корню квадратному из произведения частоты поля, магнитной проницаемости и проводимости материала экрана.

$$a = k \cdot t \cdot \sqrt{f \cdot \mu_0 \cdot \mu \cdot \frac{1}{\rho}} \quad (2)$$

где k – коэффициент вихревых токов, 1/мм [5];

t – толщина материала, мм;

f – частота магнитного поля, Гц;

μ_0 - магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;

μ - относительная магнитная проницаемость материала экрана;

ρ - удельное сопротивление материала экрана, $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$.

Значения коэффициента вихревых токов для некоторых материалов приведены в таблице 1.

Эквивалентная глубина проникновения поля, ослабленного в 2,72 раза (в «е» раз) равна

$$X_0 = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \pi \cdot f}} \quad (3)$$

Таблица 1.

f, Гц	k, 1/м		
	медь	сталь	алюминий
10^4	2,121	7,561	1,635
$6 \cdot 10^4$	5,196	18,52	4,006
10^5	6,709	23,92	5,172
$5 \cdot 10^5$	15	53,47	11,58
10^6	21,21	75,61	16,35

Для характеристики экранирующего материала пользуются еще двумя значениями глубины проникновения $X_{0,1}$, $X_{0,01}$, характеризующими падение плотности напряженности поля (ока) в 10 и 100 раз от значения на его поверхности

$$X_{0,1} = X_0 \cdot \ln 10 = 2,3 \cdot X_0; \quad (4)$$

$$X_{0,01} = X_0 \cdot \ln 100 = 4,6 \cdot X_0, \quad (5)$$

которые приводятся в справочных таблицах для различных материалов. В таблице 2 приведены значения X_0 , $X_{0,1}$, $X_{0,01}$ для меди, алюминия, стали и пермаллоя [4].

Таблица 2. Значения глубин проникновения магнитного поля X_0 , $X_{0,1}$, $X_{0,01}$ для некоторых материалов

Металл	Удельное сопротивление	Относит. Манитн. прониц.	Частота, Гц	Глубина проникновения, мм		
				X_0	$X_{0,1}$	$X_{0,01}$
Медь	0,0175	1	10^5	0,21	0,49	0,98
			10^6	0,068	0,154	0,306
			10^7	0,021	0,049	0,098
			10^8	0,0068	0,0154	0,0308
Алюминий	0,03	1	10^5	0,254	0,64	1,28
			10^6	0,088	0,2	0,4
			10^7	0,0275	0,064	0,128
			10^8	0,0088	0,02	0,04
Сталь	0,1	50	10^6	0,023	0,054	0,106
			10^7	0,07	0,016	0,032
			10^8	0,0023	0,0054	0,0106
Сталь	0,1	200	10^2	1,1	2,5	5,0
			10^3	0,35	0,8	1,6
			10^4	0,11	0,25	0,5
			10^5	0,035	0,08	0,16
Пермаллой	0,65	12000	10^2	0,38	0,85	1,7
			10^3	0,12	0,27	0,54
			10^4	0,038	0,085	0,17
			10^5	0,012	0,027	0,054

При выборе материала экрана удобно пользоваться кривыми эффективности экранирования, приведенными на графиках рис.4.

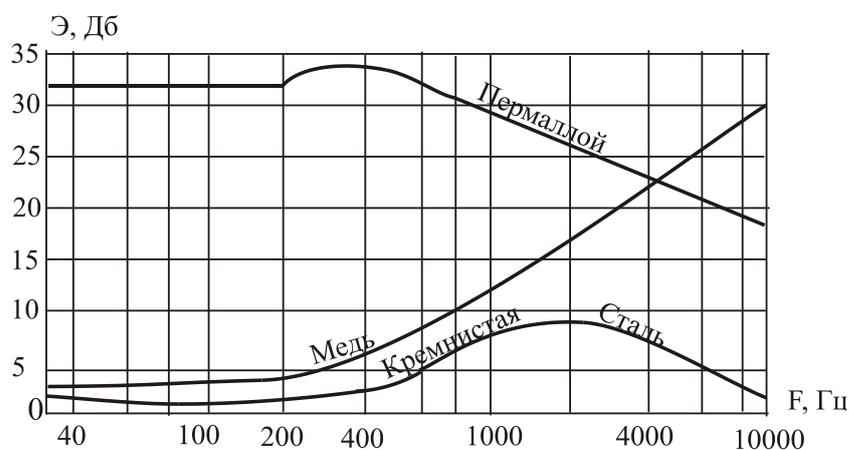


Рис.4. Кривые эффективности экранирования

Характеристики сплавов для магнитных экранов

В качестве материала магнитных экранов в слабых полях используются сплавы с высокой магнитной проницаемостью. Пермаллой, относящиеся к группе ковких сплавов с высокой магнитной проницаемостью, хорошо обрабатываются резанием и штамповкой. По составу пермаллой принято делить на низконикелевые (40-50% Ni) и высоконикелевые (72-80% Ni). Для улучшения электромагнитных и технологических свойств пермаллой часто легируют молибденом, хромом, кремнием, кобальтом, медью и другими элементами. Основными показателями электромагнитного качества этих сплавов являются значения начальной $\mu_{нач}$ и максимальной μ_{max} магнитной проницаемости. Коэрцитивная сила H_c у пермаллоев должна быть как можно меньше, а удельное электрическое сопротивление ρ и намагниченность насыщения M_s как можно более высоким. Зависимость указанных параметров для двойного сплав Fe-Ni от процентного содержания никеля представлена на рис. 5. Характеристика (рис. 5) имеет два максимума, относительный (1) и абсолютный (2). Область относительного минимума, ограниченная

содержанием никеля 40-50%, соответствует низконикелевому пермаллою, а область абсолютного максимума, ограниченная содержанием никеля 72-80% - высоконикелевому. Последний обладает и наибольшим значением μ_{\max} . Течение характеристик $\mu_0 M_s$ и ρ (рис.5) свидетельствует о том, что магнитное насыщение и удельное электрическое сопротивление у низконикелевого пермаллоя существенно выше, чем у высоконикелевого. Указанные обстоятельства разграничивают сферы применения низконикелевого и высоконикелевого пермаллоев.

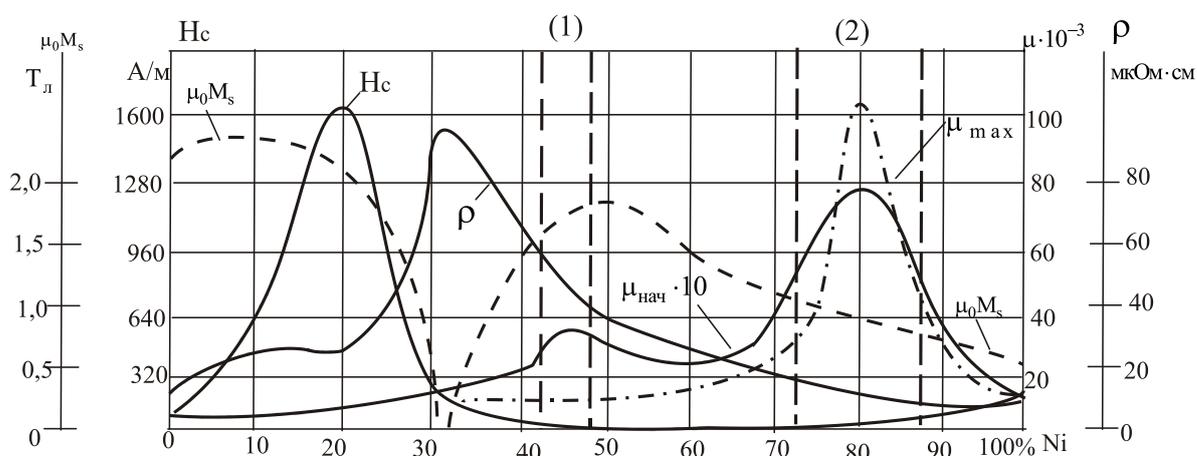


Рис. 5. Зависимость $\mu_{нач}$, μ_{max} и H_c от содержания никеля в двойном сплаве Fe-Ni.

Низконикелевый пермаллой применяют для изготовления магнитных экранов, работающих в слабых постоянных магнитных полях. Легированный кремнием и хромом низконикелевый пермаллой применяют при повышенных частотах.

Сплавы 79НМ, 80НХС, 81НМА, 83НФ с наивысшей магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях и индукцией насыщения 0,5 – 0,75 Тл для магнитных экранов, сердечников магнитных усилителей и бесконтактных реле. Сплавы 27КХ, 49КХ, 49К2Ф и 49К2ФА, обладающие высокой индукцией технического насыщения (2,1 – 2,25 Тл), применяют для магнитных экранов, защищающих аппаратуру от воздействия сильных магнитных полей.

Экраны могут быть как однослойными, так и многослойными с воздушным зазором между ними, цилиндрическими и с прямоугольным сечением. Расчет количества слоев экрана может быть проведен по достаточно громоздким формулам, поэтому выбор количества слоев рекомендуется производить по кривым эффективности экранирования, приведенными в справочниках.

При экранировании элементов изделия магнитостатическими и электромагнитными экранами следует учитывать, что они будут эффективны и как электростатические экраны, если их надежно соединить с корпусом устройства.

3. Оборудование, приборы и инструмент

При выполнении работы используются: установка для создания электромагнитного поля; генератор сигналов специальной формы АКПП-3407/1А; измерительная катушка для оценки напряженности электромагнитного поля; осциллограф АКПП-4122/10; милливольтметр ВЗ-38Б; комплект экранов, изготовленных из различных материалов.

3.1 Краткая характеристика применяемого оборудования, приборов и инструмента

3.1.1 Генератор сигналов специальной формы АКПП-3407/1А предназначен для исследования систем автоматического регулирования, испытания радиотехнических устройств, работающих в диапазонах инфранизких и звуковых частот. Предназначен для генерации сигналов стандартных форм: синусоидального, прямоугольного, треугольного, импульсного, шумового, постоянного тока, а также до 50 типов сигналов предустановленной произвольной формы. Диапазон частот генератора составляет 1 мкГц - 10 МГц с разделением на поддиапазоны. Диапазон номинальных выходных напряжений от 0,1 мВпик-пик до 10 Впик-пик.

3.1.2. Установка для создания электромагнитного поля (рис. 6).

Центральным элементом установки является катушка возбуждения электромагнитного поля 1, намотанная в один слой на немагнитный каркас 2 цилиндрической формы. Каркас укреплен на немагнитном основании 3.

Сигнал синусоидальной формы подается с генератора сигналов 10 на катушку возбуждения 1. Для подключения измерительной катушки 4 к осциллографу АКИП-4122/10 и катушки возбуждения электромагнитного поля 1 к генератору сигналов АКИП-3407/1А, на основании 3 установки укреплены клеммные гнезда 5 и 6.

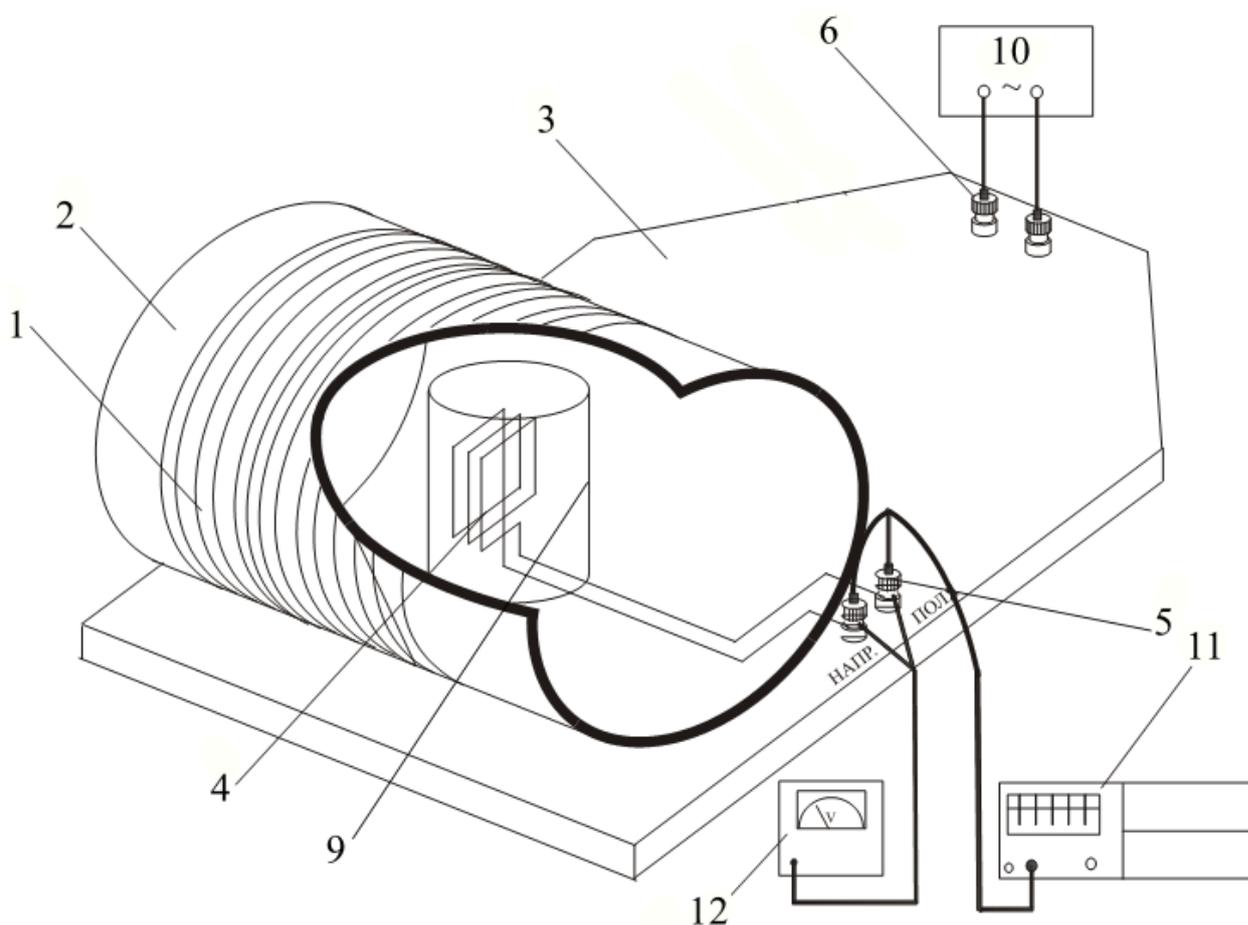


Рис. 6. Схема лабораторной установки

1 – катушка возбуждения электромагнитного поля; 2 – немагнитный каркас; 3 – немагнитное основание; 4 – измерительная катушка; 5 и 6 – клеммные гнезда; 9 – магнитный экран; 10 – генератор сигналов; 11 – осциллограф; 12 – вольтметр.

3.1.3. Исследуемые образцы экранов. Экспериментальное исследование свойств материалов для магнитных экранов осуществляется с применением образцов в форме цилиндрических стаканов 9 (рис. 6), основные параметры которых приведены в таблице 3.

Таблица 3

Основные параметры исследуемых образцов экранов

№ образца	Материал	Толщина стенки экрана, мм	Примечания
1	сталь конструкционная обыкновенного качества (ст.3 – ст.8)	1,4	однородный
2		2,4	однородный
3		5,1	однородный
4	пермаллой	0,7	однородный
5	алюминий	0,5	однородный
6		0,5	однородный
7		1,7	однородный
8	латунь	0,7	составной
9	медь	0,2	однородный
10	пермаллой 79НМ 2кл.	0,2	однослойный
11	пермаллой неотожжённый	0,4	двухслойный

4. Требования по безопасности

4.1. Перед началом работы.

4.1.1. Уяснить расположение и назначение органов управления лабораторной установки и измерительной аппаратуры.

4.1.2. Подготовить рабочее место для безопасной работы: убрать лишние предметы со стола и установки.

4.1.3. Проверить: целостность корпуса установки, питающих шнуров, штепсельных разъемов.

Не приступать к работе, если у лабораторной установки (стенда) сняты защитные панели.

4.2. Во время работы.

4.2.1. Работу можно проводить только на исправном оборудовании.

4.2.2. Не допускается перекрывание вентиляционных отверстий (жалюзей) в корпусах лабораторных установок посторонними предметами.

4.2.3. Нельзя оставлять установку включенной, отлучаясь даже на короткое время.

4.2.4. В случае перерыва в электроснабжении установки ее надо обязательно выключить.

4.3. В аварийных ситуациях.

4.3.1. Лабораторная установка немедленно должна быть выключена в следующих случаях: а) несчастный случай или угроза здоровью человека;

б) появление запаха, характерного для горячей изоляции, пластмасс, краски; в) появление треска, щелчков, искрения;

г) повреждение штепсельного соединения или электрического кабеля, питающего установку.

4.4. После окончания работы.

4.4.1. Выключить лабораторную установку и измерительные приборы.

4.4.2. Отключить установку и измерительные приборы от сети.

Привести в порядок рабочее место.

4.4.3. Убрать посторонние предметы, очистить от возможного мусора (ненужной бумаги).

5. Задание и методика исследований

5.1 Экспериментальным путем определить области эффективного использования различных материалов для электромагнитных материалов при изменении частот электромагнитного поля от 10 до 10000 Гц.

5.1.1 Подключить установку для создания электромагнитного поля к генератору сигналов. Подключить измерительную катушку к входу осциллографа и к вольтметру. Измерит амплитуду U сигнала, пропорциональную напряженности электромагнитного поля внутри цилиндрического каркаса катушки. возбуждения поля. Закрывать измерительную катушку экраном. Измерить амплитуду U' сигнала с

измерительной катушки. Определить эффективность экранирования $\varepsilon = \frac{U}{U'}$ на данной частоте и записать в таблицу (см. приложение).

5.1.2. Провести измерения по п.5.1.1. для частот 100, 500, 1000, 5000, 10000 Гц. Определить эффективность экранирования на каждой частоте.

5.1.3. Провести измерения по п.5.1.1. и п. 5.1.2 для экранов из стали обыкновенного качества, пермаллоя, алюминия, меди, латуни.

5.1.4. По результатам измерений п. 5.1.1. - 5.1.3. построить кривые эффективности экранирования для различных материалов по типу рис.4. Проанализировать результаты эксперимента. Сравнить результаты эксперимента со справочными данными, сделать выводы.

5.2. Экспериментальным путем определить влияние толщины стенки экрана (стакана) на эффективность экранирования.

5.2.1. Для материалов с высокой магнитной проницаемостью (сталь, пермаллой) эксперимент провести в электромагнитном поле на частотах 100 Гц, 500 Гц, 1000 Гц, 5000 Гц, 10000 Гц по методике, изложенной в п.5.1.1. для экранов с различной толщиной стенки.

5.2.2 Для материалов с электропроводностью (медь, алюминий) эксперимент провести на частотах 100 Гц, 500 Гц, 1000 Гц, 5000 Гц, 10000 Гц по методике, изложенной в п.5.2.1.

Проанализировать результаты эксперимента. Сравнить результаты эксперимента с данными, приведенными в таблице 1. Сделать выводы.

6. Обработка результатов эксперимента

Результаты эксперимента должны быть представлены в виде таблицы (см. Приложение) и графиков. Физические величины должны быть приведены в системе единиц СИ.

7. Требования к содержанию отчета студента по лабораторной работе

Отчет должен включать титульный лист, цель и задачи работы, основную часть, ответы на контрольные вопросы.

Основная часть отчета должна состоять из следующих разделов.

7.1. Введение (выбор и обоснование темы исследования).

7.2. Методика постановки эксперимента.

7.3. Обработка данных эксперимента.

Содержание и результаты выполненных исследований с описанием всех промежуточных и окончательных результатов.

7.4. Анализ результатов исследований, обобщения, выводы, рекомендации.

Отчет сопровождается схемами, таблицами результатов измерений, графиками.

8. Контрольные вопросы.

8.1. Чем обусловлена необходимость защиты чувствительных элементов приборов от электрических и магнитных полей?

8.2. Чем отличается принцип действия электростатических, магнитостатических и электромагнитных экранов?

8.3. Сформулируйте требования к материалам магнитостатических экранов. Назовите марки материалов и сплавов.

8.4. Назовите марки материалов для электромагнитных экранов и укажите основные требования, предъявляемые к ним.

8.5. Назовите материалы с большой глубиной проникновения постоянного магнитного поля.

8.6. Можно ли на данной установке и по данной методике определить эффективность магнитостатического экрана?

ЛИТЕРАТУРА

1. Гроднев И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот. М.: Связь. 1972. – 275с.
2. Конструирование приборов. В 2-х кн. / Под ред. В. Краузе; Пер. с нем. В.Н. Пальянова; под ред. О.Ф. Тищенко. – Кн. 1-М.: Машиностроение, 1987. – 384с.
3. Материалы в приборостроении и автоматике: Справочник/ под ред. Ю.М. Пятина. – 2е изд. Перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 1982.
4. Оберган А.Н. Конструирование и технология средств измерений. Учебное пособие. – Томск, Ротапринт ТПИ. 1987. – 95с.
5. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля. – М. Связь-издат, 1968.
6. Генератор сигналов АК ИП-3407/1А. [Электронный ресурс]. – https://prist.ru/upload/iblock/26c/4fd0h8x37wyih26u8qmmwf3295huoenc/АКІР_3407А_katalog.pdf.
7. Осциллограф цифровой, запоминающий АК ИП-4122/10. Техническое описание. [Электронный ресурс]. – https://prist.ru/upload/iblock/4d8/k6awdmmilmylpnp4f7z1gv4n98mv0cxh/АКІР_4122-NEW_katalog-_6-mod_-4-PP_.pdf.

f, Гц № экрана	100	500	1000	5000	10000	Примечание
Без экрана	U= mV					
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
4+8						
4+8+6						
2+6						

Материалы для магнитных экранов

Учебно-методическое пособие