

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Тульский Дмитрий Владимирович

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Определение остаточного магнитного поля помещения при помощи
высокочувствительного датчика магнитного поля на основе эффекта
магнитострикции**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18305

Научный руководитель:

к. ф.-м. н. А. А. Старостенко

Оценка научного руководителя

«__»_____20____ г.

Преподаватель практикума:

д. ф.-м. н. О. Е. Терещенко

Оценка преподаватель практикума

«__»_____20____ г.

Куратор практикума:

к. т. н. В. Т. Астрелин

Итоговая оценка

«__»_____20____ г.

Рекомендуется к публикации в сборнике избранных курсовых работ

Научный руководитель

А.А. Старостенко

Преподаватель практикума
Куратор практикума

О.Е.Терещенко
И. А. Иванов

Определение остаточного магнитного поля помещения при помощи высокочувствительного датчика магнитного поля на основе эффекта магнитострикции

Тульский Дмитрий Владимирович

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа №18305, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

Старостенко Александр Анатольевич

Аннотация

Целью работы являлось определение остаточного магнитного поля помещения при помощи высокочувствительного датчика магнитного поля. Под остаточным магнитным полем стоит понимать сумму магнитного поля Земли и магнитных полей, возникаемых за счет намагничивания различных металлоконструкций внутри измерительной комнаты. Принцип работы датчика основан на обратном эффекте магнитострикции. Для выполнения поставленной цели была создана колебательная система, состоящая из катушки индуктивности, ферромагнетика в виде ферритового стержня и генератора высокочастотных механических колебаний.

В ходе выполнения курсовой работы была получена калибровочная кривая магнитоизмерителя и получена величина остаточного магнитного поля в помещении стенда магнитных измерений ИЯФ СО РАН, где и проводились измерения. Полученное значение совпадает с теоретическим в пределах погрешности, вызванной неточностью измерений и неидеальностью экспериментальной установки.

Аннотация

Целью работы являлось определение остаточного магнитного поля помещения при помощи высокочувствительного датчика магнитного поля. Под остаточным магнитным полем стоит понимать сумму магнитного поля Земли и магнитных полей, возникаемых за счет намагничивания различных металлоконструкций внутри измерительной комнаты. Принцип работы датчика основан на обратном эффекте магнитострикции. Для выполнения поставленной цели была создана колебательная система, состоящая из катушки индуктивности, ферромагнетика в виде ферритового стержня и генератора высокочастотных механических колебаний.

В ходе выполнения курсовой работы была получена калибровочная кривая магнитоизмерителя, исходя из которой численная величина остаточного магнитного поля на месте стенда магнитных измерений ИЯФ СО РАН составила $0,54 \pm 0,12$ единиц в системе СГС. Полученное значение совпадает с теоретическим в пределах погрешности, вызванной неточностью измерений и неидеальностью экспериментальной установки.

Ключевые слова: остаточное магнитное поле, эффект обратной магнитострикции, ферромагнетик, катушка индуктивности, калибровочная кривая магнитоизмерителя.

Оглавление

Аннотация	4
Введение.....	4
1 Теоретическая часть	5
1.1 Ферромагнетики и эффект магнитострикции	5
1.2 Колебания ферритового стержня в катушке индуктивности	7
2 Экспериментальная часть	9
2.1 Экспериментальная установка	9
2.2 Результаты измерений	11
Заключение	14
Список литературы	14

Введение

На сегодняшний момент существует большое количество типов магнитометров. Так, например, наряду с относительно дешевыми и простыми в использовании датчиками Холла широко используются датчики на основе явления ядерного магнитного резонанса, высокочувствительные, но требующие сложной электроники. Также к числу распространенных датчиков можно отнести феррозонды, основанные на явлении изменения магнитного состояния ферромагнетиков в переменных магнитных полях; сквиды (сверхпроводящие квантовые измерители магнитного потока), магниторезистивные и магнитодиодные датчики, и другие. Все эти магнитометры основаны на различных физических принципах. Они используются во многих сферах человеческой деятельности: геофизика, медицина, магнитная дефектоскопия, поиск металлических предметов и так далее. Это доказывает необходимость разработки и улучшения датчиков магнитного поля для дальнейшего развития перечисленных областей труда.

Целью данной работы являлось определение остаточного магнитного поля помещения при помощи высокочувствительного датчика магнитного поля.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Построить теоритическую модель колебательной системы, представляющей создаваемый датчик магнитного поля.
2. Создать приближенную к теоритической экспериментальную установку для магнитных измерений:
 - создание подходящей под теоретическую модель катушки индуктивности в колебательной системе
 - создание подвеса стржня для колебания ферромагнетика в катушке на резонансной частоте согласно теории

3. Получить калибровочную кривую измерительного прибора и на ее основе определить величину остаточного магнитного поля помещения, в частности стенда магнитных измерений ИЯФ СО РАН.

1 Теоретическая часть

1.1 Ферромагнетики и эффект магнитострикции

Ферромагнетики – это твердые вещества, обладающие намагниченностью в отсутствии внешнего магнитного поля ниже определенной температуры, называемой температурой или точкой Кюри.

Под «намагниченностью» [3] стоит понимать такую векторную физическую величину как магнитный момент единицы объема тела. Как и в случае электрических зарядов и электрического дипольного момента, в атомах вещества может существовать нескомпенсированный магнитный момент. Такая неоднородность зачастую возникает за счет приложения к телу внешнего магнитного поля и как следствие действию этого поля на элементарные частицы со своими собственными магнитными моментами.

В случае ферромагнетиков процесс намагничивания, то есть возникновения у тела ненулевого магнитного момента, усложняется наличием у кристалла доменной структуры.

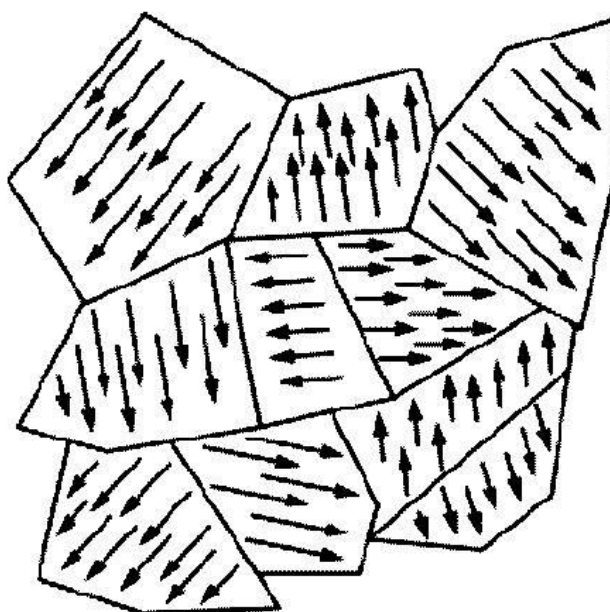


Рисунок 1. Доменная структура.

Домены (Рисунок 1) [3], малые макроскопические области вещества, обладающие собственным магнитным моментом (сумма этих моментов по всем доменам кристалла равняется нулю), создаваемым сонаправленными магнитными моментами атомов, как раз таки определяют поведение магнитного состояния вещества при наличии внешнего магнитного поля. За счет этого поля, в зависимости от величины и быстроты его изменения, доменные структуры будут перестраиваться (уменьшаться или увеличиваться) и менять направление своего магнитного момента. Подтверждением того является гистерезисная кривая намагничивания ферромагнетика (зависимость его намагниченности M от внешнего поля H) (Рисунок 2).

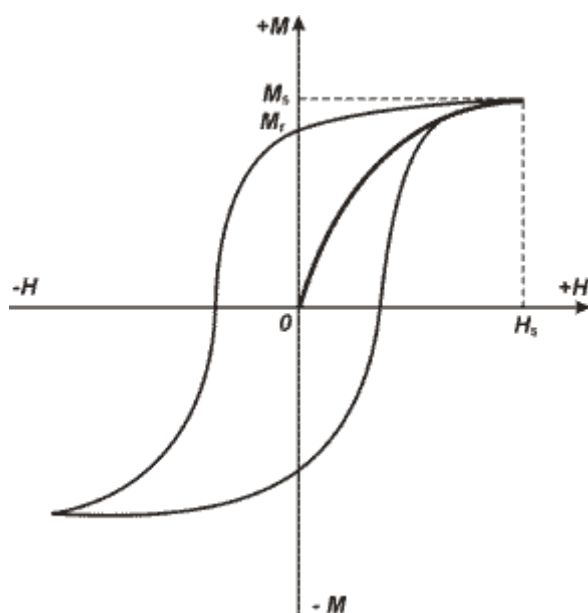


Рисунок 2. Гистерезис ферромагнетика.

Магнитострикция – это явление, заключающееся в том, что при изменении состояния намагниченности тела его объём и линейные размеры изменяются. Обратный магнитострикционный эффект, заключающийся в изменении намагниченности тела при его деформации (эффект Виллари), как и саму магнитострикцию можно объяснить на основе термодинамических уравнений.

Если, в качестве независимых переменных, характеризующих состояние магнетика, выбрать температуру T , давление P , и напряженность внешнего

поля H , то уравнение термодинамики в дифференциальной форме представляется в следующем виде:

$$\delta\Phi = -S\delta T + V\delta P - J\delta H, \quad (1)$$

где Φ - термодинамический потенциал, V - объем, S - энтропия, J - намагниченность. Отсюда непосредственно получаются следующие равенства:

$$\left(\frac{\delta J}{\delta P}\right)_{H,S} = -\left(\frac{\delta V}{\delta H}\right)_{P,S} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\delta J}{\delta \sigma}\right)_{H,S} = \left(\frac{\delta l}{\delta H}\right)_{P,S} \quad (3)$$

Из равенств (2) и (3) видно, что изменение намагниченности под действием всестороннего давления (или напряжения σ), связано с изменением объема (или линейных размеров l) магнетика при действии магнитного поля.

Намагниченность тела J имеет функциональную связь $J=f(\chi, H)$ с внешним магнитным полем H , и эта зависимость определяется переменным коэффициентом χ , называемым магнитной восприимчивостью. Эта величина характеризует способность тела намагничиваться. Существует функция, связывающая χ и коэффициент магнитной проницаемости μ . Соответственно, при изменении намагниченности тела путем деформации магнетика будет изменяться его магнитная восприимчивость и как следствие магнитная проницаемость в силу постоянности внешнего магнитного поля.

1.2 Колебания ферритового стержня в катушке индуктивности

Как было установлено ранее, в случае деформации магнетика, в частности, ферритового стержня его магнитная проницаемость будет изменяться. При деформации изгиба магнитная проницаемость стержня будет меняться слабо, так как противоположные стороны феррита будут испытывать продольную деформацию разных знаков. Интерес представляют продольные колебания стержня, так как они наиболее просты в реализации.

Функциональная зависимость $u(x,t)$ [2] перемещения упругого стержня от времени t и координаты перемещения x в случае продольных колебаний, представляет собой сумму частных решений соответствующего уравнения (4).

$$a^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \quad (4)$$

Решая данное уравнение методом Фурье (представляя $u(x,t)$ как произведения функций, зависящих только от x и только от t) получаем сумму u_n из формулы (5), а именно бесконечную сумму гармонических функций. Резонанс в такой колебательной системе возможен в случае совпадения частоты вынужденных колебаний стержня с частотой какой-либо линейной комбинации из этой суммы.

$$a^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} \quad (4)$$

$$u_n(x, t) = \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right) \left(A \cos\left(\frac{\pi n a}{l} t\right) + B \sin\left(\frac{\pi n a}{l} t\right) \right), \quad (5)$$

где l - длина стержня, t - время, A и B - константы, n - целое число, изменяющееся от 1 до ∞ .

Явления резонанса [1], возникшего за счет совпадения вынужденной частоты и частоты одной из гармоник в формуле (5), представляет интерес с точки зрения возможности более простой регистрации колебаний. В таком случае колебания стержня будут описываться всего одной модой, и поэтому изменение их амплитуды будет легче зарегистрировать. Из всех собственных частот стержня, отличающихся друг от друга в целое n число раз, необходимо выбрать частоту, соответствующую «полуволновой» моде колебаний. Именно при такой частоте, когда узел колебания, точка раздел областей пучности волны, находится посередине стержня, магнитная проницаемость ферритового образца меняется наибольшим образом.

$$\Phi = \iint_S (B, dS) \quad (6)$$

$$E = -\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

Опираясь на определение магнитного потока через замкнутый контур S (6) и формулу $B = \mu(\chi) \cdot H$, связывающую магнитную индукцию B и напряженность внешнего поля H через коэффициент магнитной проницаемости, получаем, что при изменении магнитной проницаемости стержня будет происходить изменение магнитного потока Φ через катушку индуктивности. Изменение потока по закону Фарадея (8) повлечет за собой возникновения ЭДС индукции E на катушке. Фиксируя амплитуды колебаний данной ЭДС при различных магнитных полях внутри катушки, можем откалибровать создаваемый датчик магнитного поля, то есть сопоставить величину амплитуды колебаний заранее известной величине внешнего магнитного поля.

2 Экспериментальная часть

2.1 Экспериментальная установка

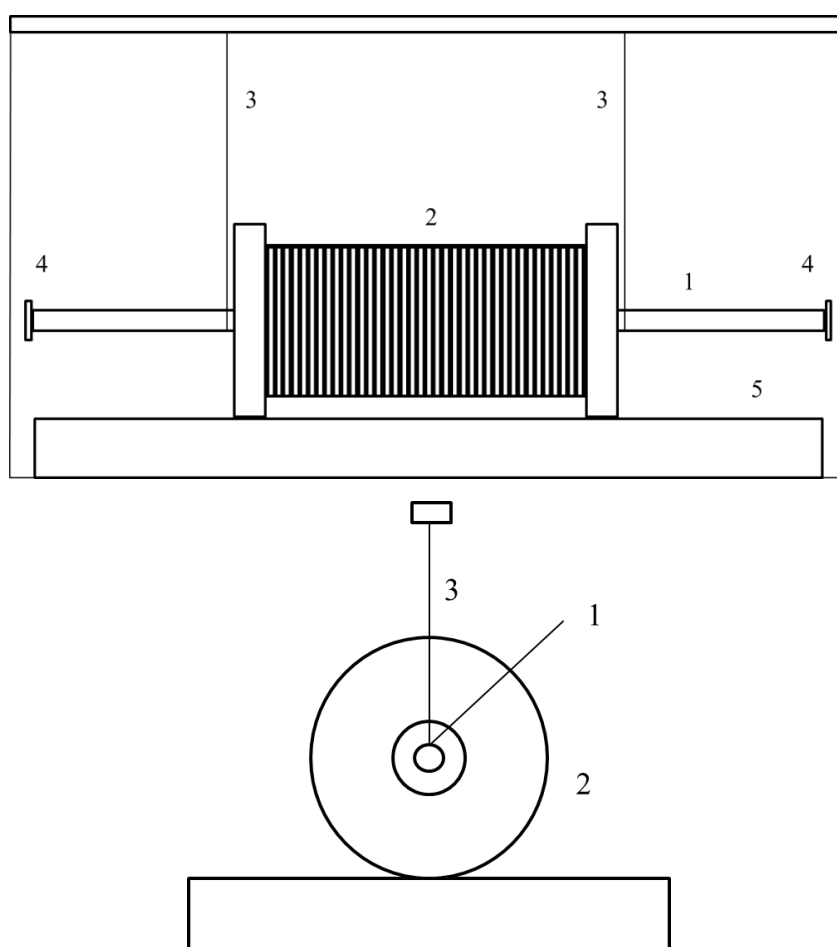


Рисунок 3. Схема экспериментальной установки для измерения магнитного поля на основе эффекта магнитострикции.

На рисунке 3 схематически представлена экспериментальная установка для измерения магнитного поля Земли на основе эффекта магнитострикции. Колебания в этой установке совершаются ферритовым стержнем длиной 20 см. Длина стержня была выбрана, исходя из расчета его основной частоты:

$$f(n) = \frac{nV}{2L},$$

где $n=1$ (номер гармоники), V – скорость звука в феррите, равная 5320 м/с, L – длина стержня.

Основная собственная частота равняется 13300 кГц при $L=20$ см, что облегчает задачу подбора элементов электросхемы генератора колебаний.

Несмотря на теоретическую эффективность «полуволновой» моды колебаний, в силу несовершенства экспериментальной установки (невозможности закрепления стержня в середине, отсутствия гибких опор и подходящих для больших резонансных частот пьезоизлучателя и пьезоприемника) колебания в стержне совершаются на частоте равной 14 кГц. Катушка индуктивности (2) из стеклотекстолита имеет 3000 витков медного провода диаметром 0,16 миллиметров. Такое количество витков обеспечит достаточное для высокой чувствительности прибора потокосцепление и как следствие величину магнитного потока через катушку. Катушка индуктивности приклеена к немагнитному каркасу установки (5) во избежание погрешности в измерениях. К этому же каркасу привязан нитями (3) стержень для акустической развязки с катушкой. Колебания в системе происходят за счет двух пьезодатчиков (4), расположенных на торцах ферритового стержня. Пьезоизлучатель и пьезоприемник ЗП-31 подключены в электрическую схему для возбуждения акустических колебаний в стержне на необходимой резонансной частоте. Определение калибровочной кривой прибора проводилось на базе стенда магнитных измерений ИЯФ СО РАН. Для определения калибровочной кривой прибора установка была изменена в целях помещения датчика в соосное с измерительной катушкой однородное магнитное поле. Величина данного поля определялось при помощи

магнитометра «НПЦ» ТПУ с преобразователем Холла. Величина относительной погрешности варьируется в пределах $\pm 2\%$. Для уменьшения погрешности измерений, сопоставления амплитуды колебаний и величины внешнего поля, ферритовый стержень при помощи многовитковой катушки размагничивался на протяжении всего эксперимента.

2.2 Результаты измерений

После сборки экспериментальной установки было проведено первичное тестирования работы датчика магнитного поля. Проверялось изменение амплитуды колебаний ЭДС на концах катушки при различном положении магнита вблизи нее. На графиках 1 и 2 представлены характерные графики колебаний ЭДС в катушке при прохождении магнитных линий магнита по полю проходящему через катушку и против него. Это доказывает работу датчика, показывая при этом большую чувствительность прибора с большим диапазоном изменения амплитуды.

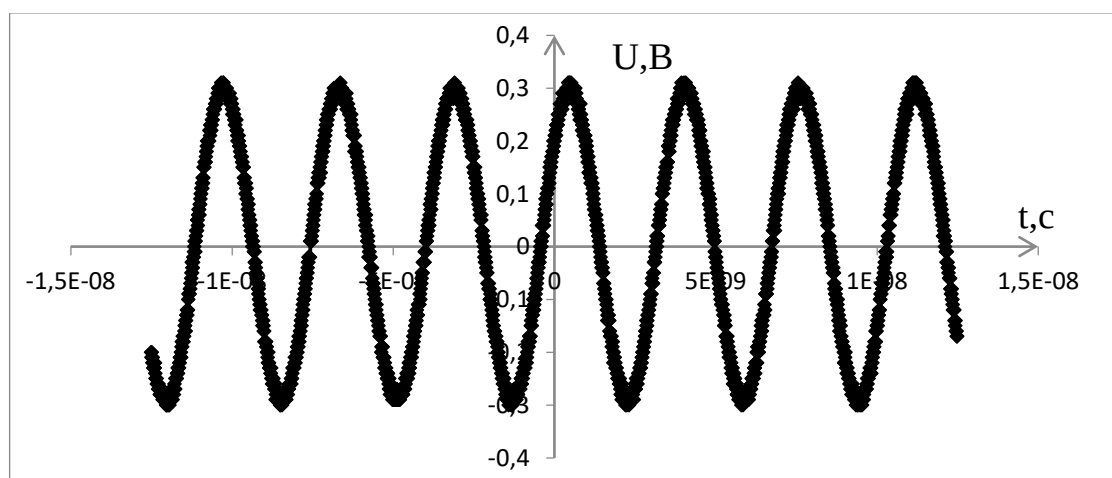


График 1. Характерный сигнал ЭДС катушки при увеличении поля внутри магнитом.

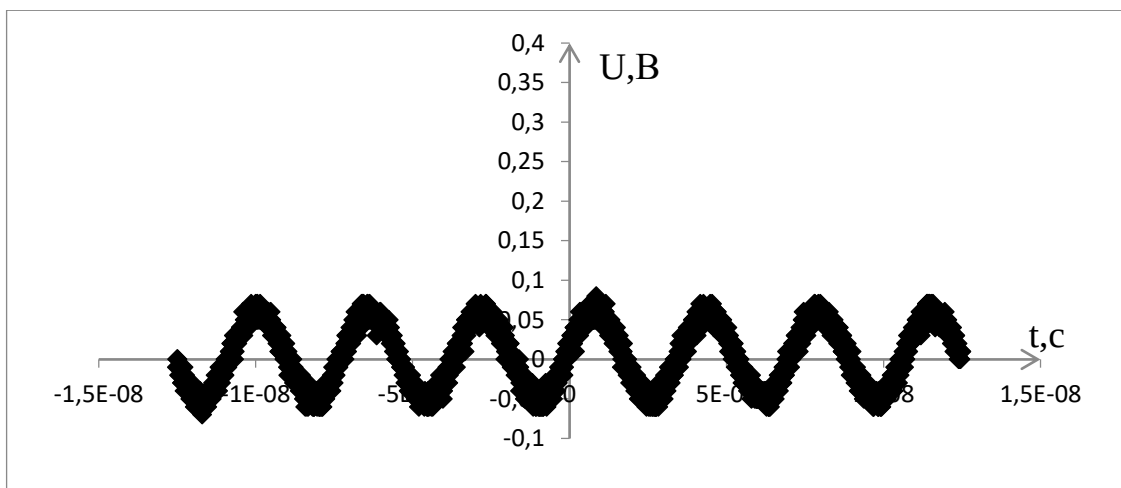


График 2. Характерный сигнал ЭДС катушки при уменьшении поля внутри магнитом.

В таблице приведены значения тока I , подаваемого на многовитковую измерительную катушку стенда магнитных измерений, значения магнитного поля H внутри катушки и соответствующие им величины амплитуды ЭДС сигнала U :

I, A	$H, Гс$	$U, В$
0,05	0,5	0,11
0,1	0,7	0,13
0,15	1	0,16
0,2	1,3	0,19
0,25	1,6	0,2
0,3	1,8	0,23
0,35	1,9	0,22
0,4	2,2	0,27
0,45	2,4	0,3
0,5	2,7	0,35
0,55	3	0,39
0,6	3,2	0,45
0,65	3,5	0,53
0,7	3,7	0,61
0,75	4	0,73
0,8	4,3	0,83
0,85	4,6	0,96
0,9	4,8	1,01
0,95	5,1	1,11
1	5,3	1,17

I, A	$H, Гс$	$U, В$
1,25	6,5	1,25
1,5	7,8	1,33
1,75	9,1	1,45
2	10,4	1,91
2,25	11,6	2,01
2,5	12,9	2,09
2,75	13,8	2,13
3	15	2,27
3,25	16,1	2,51
3,5	17,3	2,93
3,75	18,4	3,28
4	19,6	3,58
4,25	21,1	4,66
4,5	22,1	5,47
4,75	23,4	8,6
5	24	6,71
5,25	27,5	10,1
5,5	28,5	13,9
5,75	29,6	22,3
6	30,2	41

По этим данным построены калибровочные кривые измерительного прибора, а именно экспериментально определенные зависимости амплитуды сигнала от значения внешнего магнитного поля, регистрируемого датчиком. На графиках 3 и 4 представлены такие кривые калибровки при малых и больших магнитных полях в измерительной катушке стенда.

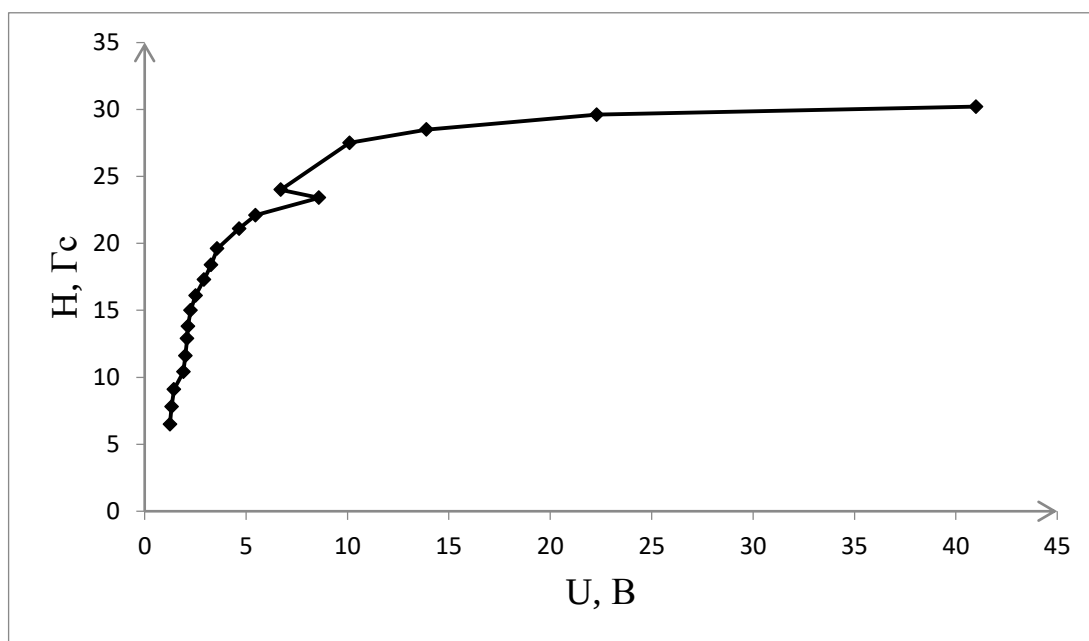


График 3. Зависимость внешнего магнитного поля от амплитуды ЭДС-сигнала катушки при изменении внешнего поля от 0,05 Гс до 30 Гс.

По графику 4 путем аппроксимации кривой получена возможная функциональная зависимость $H(U)$ при полях меньше 1 Гаусса. С учетом амплитуды сигнала в отсутствии внешнего поля в измерительной катушки, равном 100 ± 20 мВ, и полученной зависимости $H = k \cdot U_{ampl}$, где $k = 5,25 \pm 0,23$, величина остаточного поля стенда магнитных измерений ИЯФ (помещения, где проводились измерения) составила $0,52 \pm 0,12$ Гс.

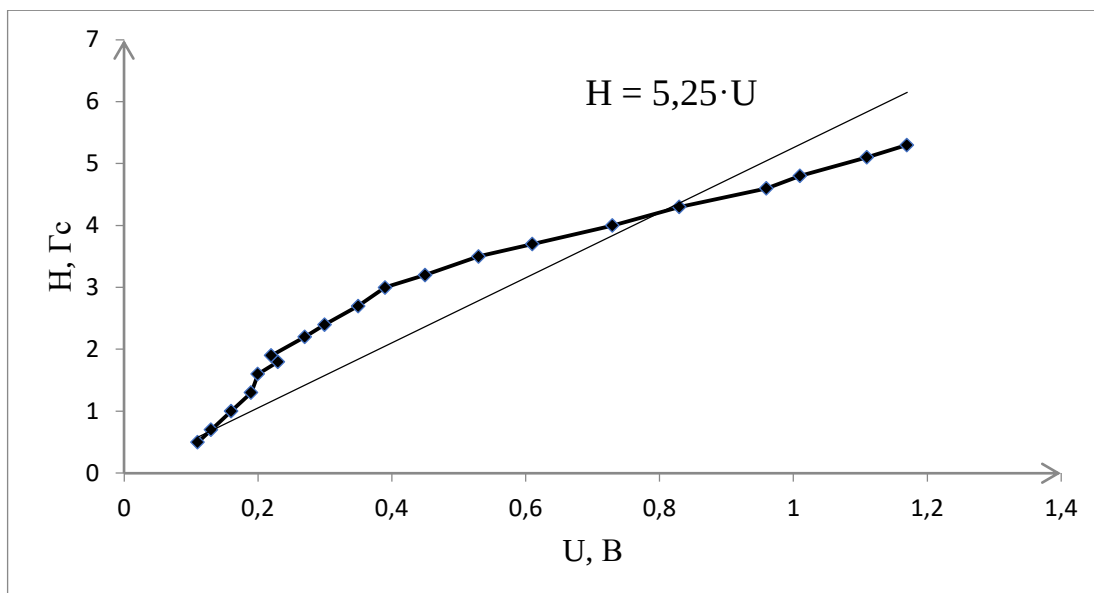


График 4. Зависимость внешнего магнитного поля от амплитуды ЭДС-сигнала катушки при изменении внешнего поля от 0,05 Гс до 1 Гс.

Заключение

В ходе выполнения курсовой работы был создан высокочувствительный датчик магнитного поля. Исходя из калибровочной кривой полученного измерительного прибора чувствительность датчика составила 190 мВ/Г, что в превышает примерно в 2000 раз чувствительность того же линейного датчика Холла, в лучшем случае составляющую 1000 мВ/Тл. Также к достоинствам установки можно отнести дешевизна компонентов, портативность и простота сборки.

Экспериментально полученное значение остаточного поля помещения сходится с теоретически ожидаемым, находящимся в пределах 1 поля Земли (0,5-0,7 Гс).

В качестве доработки экспериментальной установки планируется изменение длины катушки для обеспечения меньших акустических потерь колебаний, а также подбор пьезодатчиков, рассчитанных на большую частоту колебаний.

Список литературы

1. Казанцев, Коблик, Сотниченко.- Высокочувствительный датчик постоянного и низкочастотного магнитного поля с акустической «накачкой» // статья из второго выпуска журнала «Приборы и техника эксперимента на стр. 1-5//
2. Анофрикова.- Колебания упругих стержней. Часть 1: Учеб. пос. ММФ СГУ.- Саратов: [б. и.], 2004.- 45 с.
3. Костюрина, Бордзиловский, Максимов, Терещенко.- Электрические и магнитные свойства твердых тел // стр. 43-58 2-ого выпуска учебно-методического пособия для студентов ФФ НГУ в рамках лабораторного практикума по электричеству и магнетизму//