

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕ-
ЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИС-
СЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ».

Физический факультет

Кафедра общей физики

Гордеев Клим Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

**Измерение малых магнитных полей с использованием
датчика “феррозонд”**

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18352

Научный руководитель:

к. т. н.

Павленко А. В.

Оценка научного руководителя

«__» _____ 2019 г.

Преподаватель практикума:

доцент.

Костюрина А. Г.

Оценка преподавателя практикума

«__» _____ 2019 г.

Куратор практикума:

к. т. н., доцент

Астрелин В. Т.

Итоговая оценка

«__» _____ 2019 г.

Новосибирск 2019 г.

Аннотация

Целью данной работы является исследование феррозондового датчика с высокой чувствительностью для измерения малых магнитных полей, а также расчет чувствительности и коэффициента уплотнения силовых линий. Датчик “феррозонд” помещался в соленоид, в котором создавалось магнитное поле. На обмотку возбуждения датчика с генератора подавался прямоугольный сигнал и снималось напряжение с измерительной обмотки. По измерительному напряжению рассчитывался коэффициент чувствительности и коэффициент уплотнения силовых линий с помощью таблицы excel. В ходе работы было проверено, что чувствительность датчика не зависит от величины магнитного поля по модулю, от направления магнитного поля и от подаваемого напряжения. Полученные результаты хорошо согласовались с известными данными.

Ключевые слова: феррозондовый магнитометр, измерение малых магнитных полей, чувствительность датчика, коэффициент уплотнения силовых линий.

Оглавление

Введение	3
Принцип действия датчика	4
Описание установки.....	5
Работа катушки возбуждения	6
Работа катушки считывания	11
Результаты измерений	14
Анализ погрешностей	15
Заключение	16
Используемая литература	16

Введение

Измерение магнитных полей является важнейшей задачей в области космических и геофизических исследований, функционирования систем навигации, ориентации и стабилизации, в системах экранирования квантовых компьютеров, а также применяются в ускорительной технике. Средства измерений магнитного поля высокой точности используются при поиске и обнаружении магнитных аномалий, измерении токов, в сотовых телефонах, ноутбуках и т.д.

Силовой характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции, а средство измерения модуля вектора магнитной индукции называется *магнитометром*.

Датчик магнитного поля является основным элементом любого магнитометра и предназначен для преобразования магнитной индукции B в электрический сигнал, чаще всего в напряжение U .

Магнитные поля обычно подразделяют на сверхсильные (свыше 100 Тл), сильные (от 4 до 100 Тл), средние (от 0,05 до 4 Тл) и слабые (менее 0,05 Тл). В зависимости от области применения магнитометра и величины измеряемого магнитного поля возникает проблема выбора того или иного датчика. Для измерения слабых магнитных полей могут использоваться феррозондовые преобразователи.

Феррозондовые магнитометры обладают высокой чувствительностью, и стабильностью в работе, способны измерять поля в диапазоне 0,1 – 1 мТл, обеспечивая абсолютную погрешность измерений 0,1 – 1 % и могут обладать разрешающей способностью сотен и даже десятков нанотесла.

Принцип действия датчика

Действие феррозонда основано на изменении магнитного состояния ферромагнетика под воздействием двух магнитных полей разных частот.

В простейшем варианте феррозонд состоит из ферромагнитного сердечника и находящихся на нем двух обмоток: обмотки возбуждения, питаемой переменным током и измерительной (сигнальной) обмотки. Обмотка возбуждения намотана вокруг сердечника тороидальной формы, а обмотки считывания – охватывают сердечник целиком и намотаны перпендикулярно друг другу, обеспечивая измерение двух компонент вектора магнитного поля.

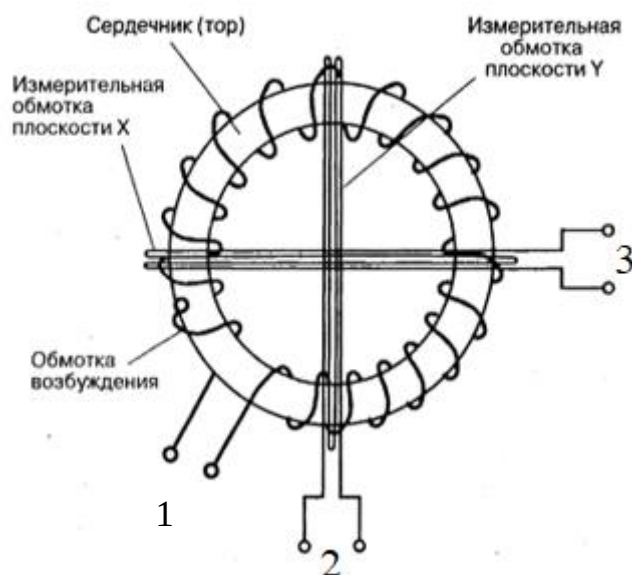


Рис. 1.1. а) Конструкция феррозонда (1 – контакты катушки возбуждения, 2,3 – контакты катушек считывания)

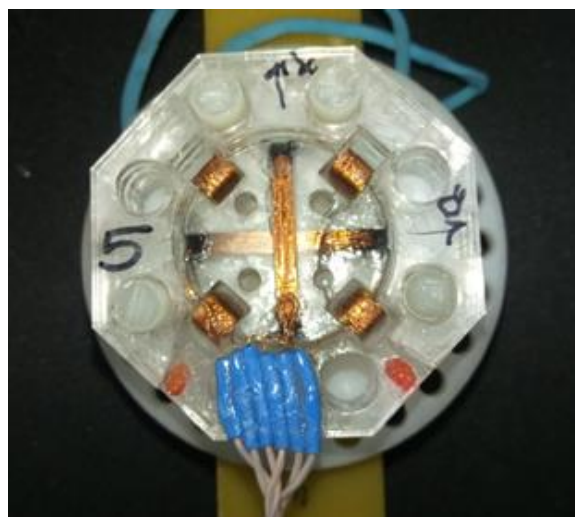


Рис. 1.1. б) Феррозондовый магнитометр

В данной работе используется сердечник феррозонда из материала с высокой магнитной проницаемостью $\mu \gg 1$ («лента аморфная» марки 2НСР [1]). На катушку возбуждения (контакты 1, рис.1) от специального генератора подается переменное напряжение с частотой от 1 до 300 кГц. Катушка считывания полностью охватывает кольцевой сердечник, по этой причине магнитный поток, генерируемый катушками возбуждения, через её площадь полностью скомпенсирован и напряжение на выходах 2 и 3 равно нулю. В присутствии

внешнего магнитного поля на катушке считывания возникает сигнал с удвоенной частотой. Измеряя этот сигнал можно судить о величине внешнего поля.

Описание установки

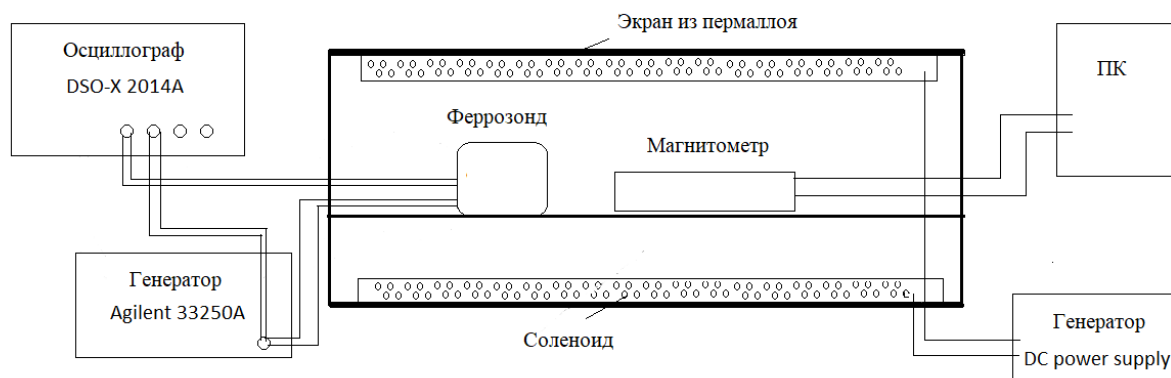


Рис.1.2. Схема установки

Исследуемый феррозонд и магнитометр COLIY GF-Y10 [2] помещались и надежно фиксировались в экранированном пермаллоем соленоиде из 160 витков. Величина и направление тока через соленоид регулировались с помощью лабораторного источника питания. С генератора Agilent 33250A [3] подавался сигнал на катушку возбуждения феррозонда. Сигналы с катушек считывания и возбуждения регистрировались с помощью осциллографа DSO-X 2014A [4], позволяющего сохранять данные на usb flash. Измеренные данные импортированы в таблицу Excel для обработки.



Рис. 1.3. Установка

Работа катушки возбуждения

Рассмотрим работу катушки возбуждения на основе простой модели. Предположим, что сердечник, вокруг которого намотана катушка возбуждения, обладает постоянной магнитной проницаемостью $\mu \gg 1$, которая скачком падает до 1 при достижении насыщения. Как правило, материалы с большой магнитной проницаемостью обладают свойствами гистерезиса, которыми мы в данный момент пренебрежём.

Значение индуктивности катушки пропорционально магнитной проницаемости сердечника, следовательно, величина индуктивности будет также скачком уменьшаться при достижении некоторой величины тока (см. рис.2).

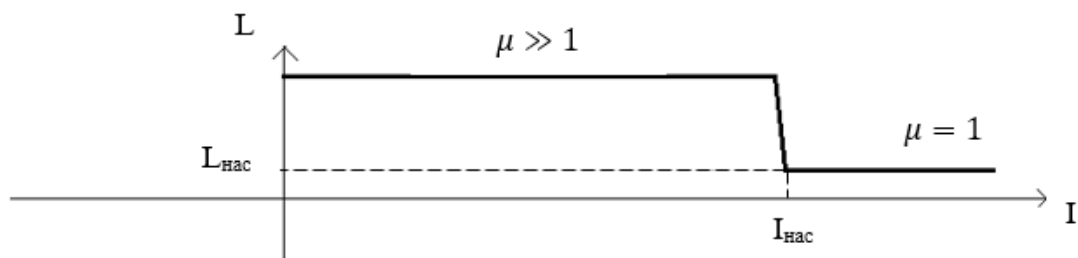


Рис. 2. Зависимость индуктивности от тока

Предположим, что ток в катушке возбуждения задается идеальным генератором напряжения. Величина этого напряжения в некоторый момент времени меняется с 0 до U . Тогда согласно закону Фарадея: $\frac{d\Phi}{dt} = -E_{ind}$ и потоку: $\Phi = LI$, ток в катушке будет нарастать по линейному закону: $I = \frac{U}{L}t$. Причем, при достижении тока насыщения $I_{нас}$, индуктивность катушки значительно уменьшится, а скорость нарастания тока возрастет (см. рис. 3).

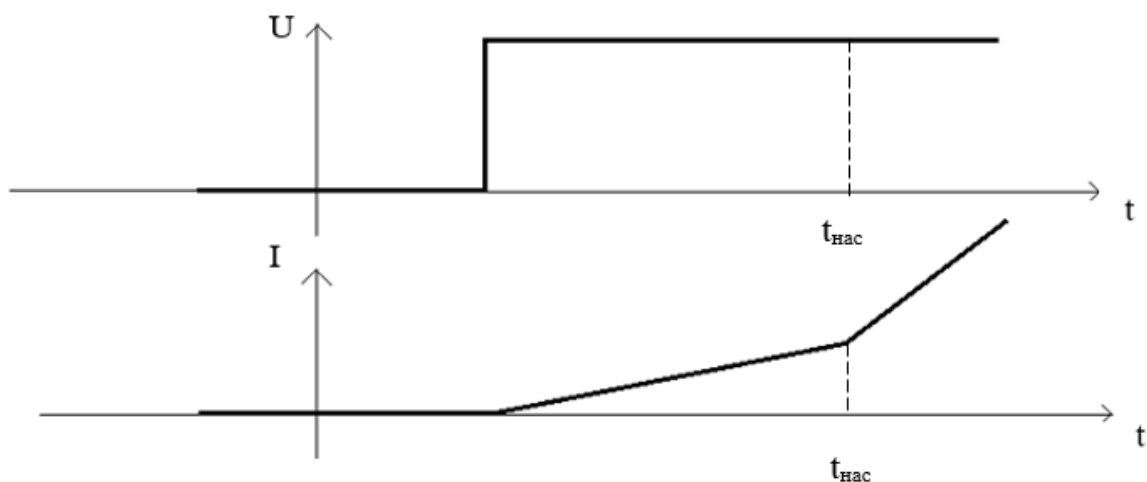


Рис. 3. Схематическая зависимость тока и напряжения от времени

Изменение угла прямой при $t_{нас}$ свидетельствует о насыщении проводника ($\mu = 1$).

В идеальном случае – нарастание тока ничем не ограничено, однако, на практике, собственным сопротивлением обладает катушка индуктивности, реальный источник напряжения, кроме того, иногда устанавливается внешний токоограничивающий резистор. Закон Ома для такой цепи будет иметь вид:

$$U_L = U - IR = L \frac{dI}{dt}. \quad (1)$$

Решая дифференциальное уравнение (1) (Предполагая, что $I = I_0 e^{-t/\tau} + C$ и исходя из граничных условий), получаем уравнение тока на индуктивности:

$$I = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{R}{L}t}). \quad (2)$$

Тогда, согласно (1) и (2) напряжение на индуктивности:

$$U_L = U e^{-\frac{R}{L}t}. \quad (3)$$

График тока и напряжения на индуктивности схематично будет выглядеть следующим образом:

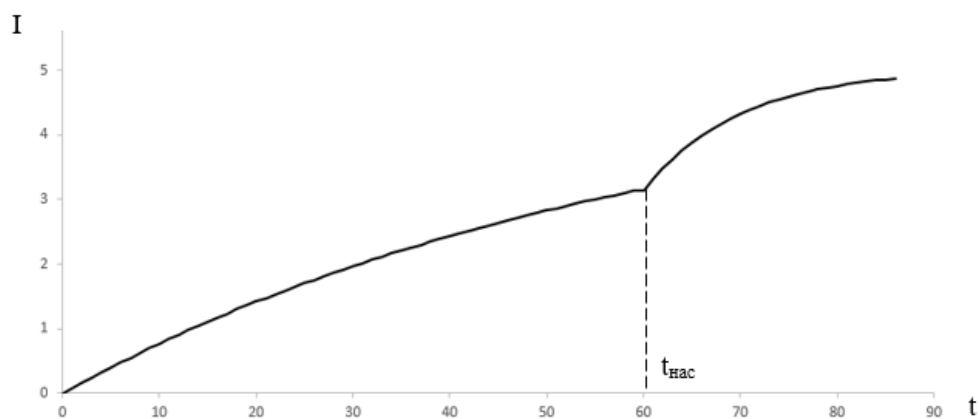


Рис. 4. Схематичная зависимость тока от времени

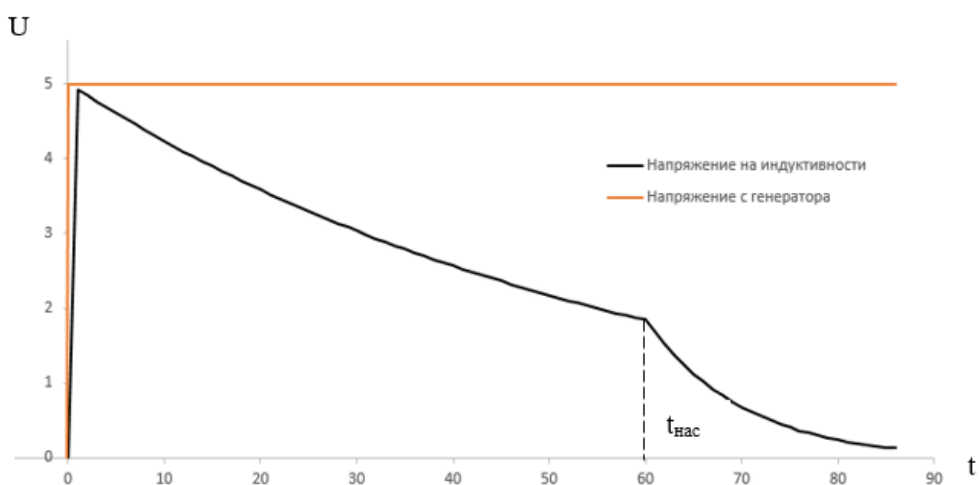


Рис. 5. Схематичная зависимость напряжения от времени

Рассмотрим, что будет происходить при смене напряжения с U на $-U$. Ток при этом также сменит свое значение с I на $-I$. Схематично, график процесса показан на рис.6, 7, на нём можно выделить три характерных области. В начальный момент времени катушка находится в насыщенном состоянии и ток будет спадать с I_{max} до $I_{нас}$ с маленькой постоянной времени (область 1). Перейдя значение $I_{нас}$ сердечник выйдет из состояния насыщения, индуктивность катушки возрастет и процесс падения тока замедлится (область 2), и процесс будет идти с такой скоростью до достижения тока $-I_{нас}$. Затем (область 3) сердечник вновь находится в насыщенном состоянии и ток быстро достигает величины $-I_{max}$.

На рис. 6 и 7 изображено поведение напряжения и тока на катушке, соответствующее рассмотренной модели. Для простоты аппроксимируем экспоненту прямой линией.

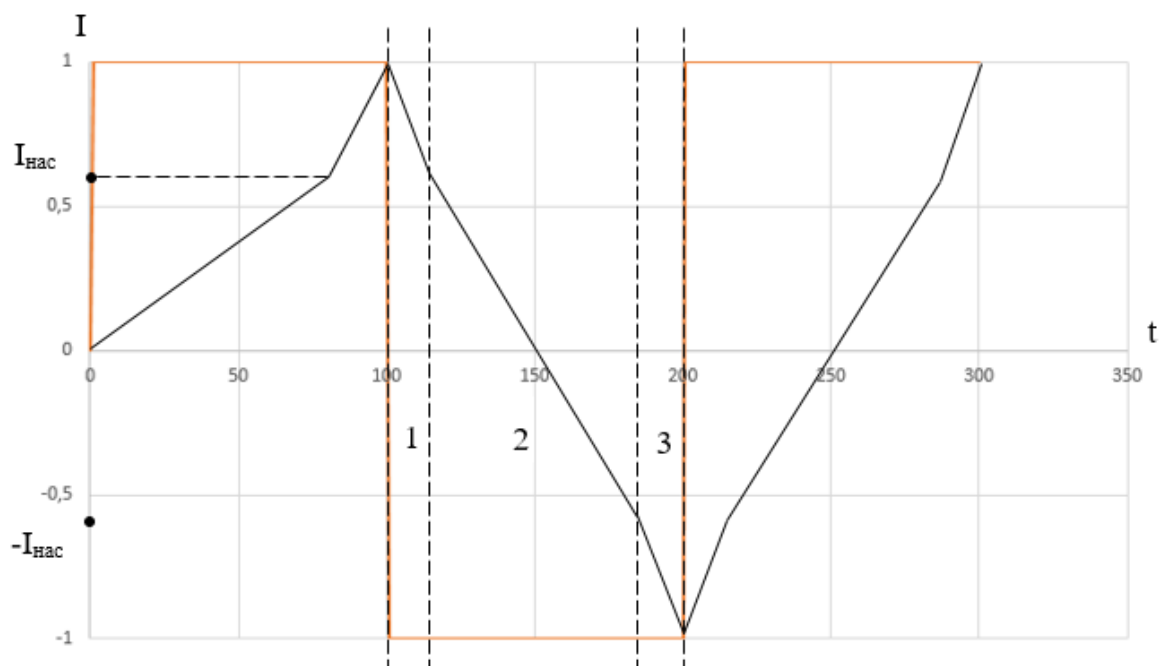


Рис. 6. Схематичная зависимость тока в катушке. 1,3 - области насыщения, 2 – область выхода из насыщения

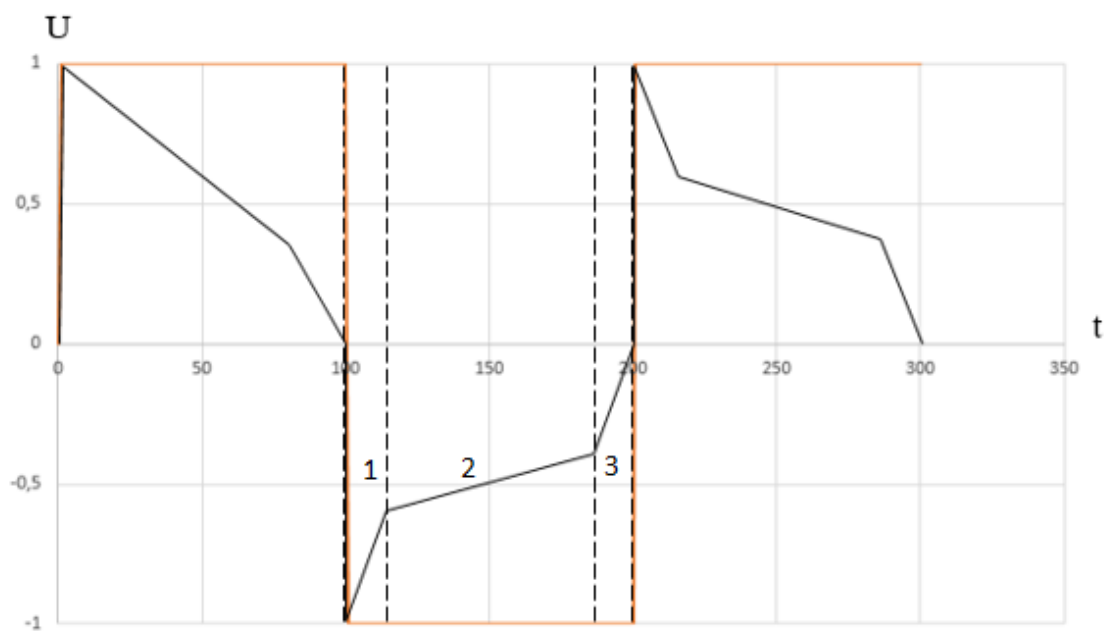


Рис. 7. Схематичная зависимость напряжения в катушке. 1,3 - области насыщения, 2 – область выхода из насыщения

Сравним с реальным графиком:

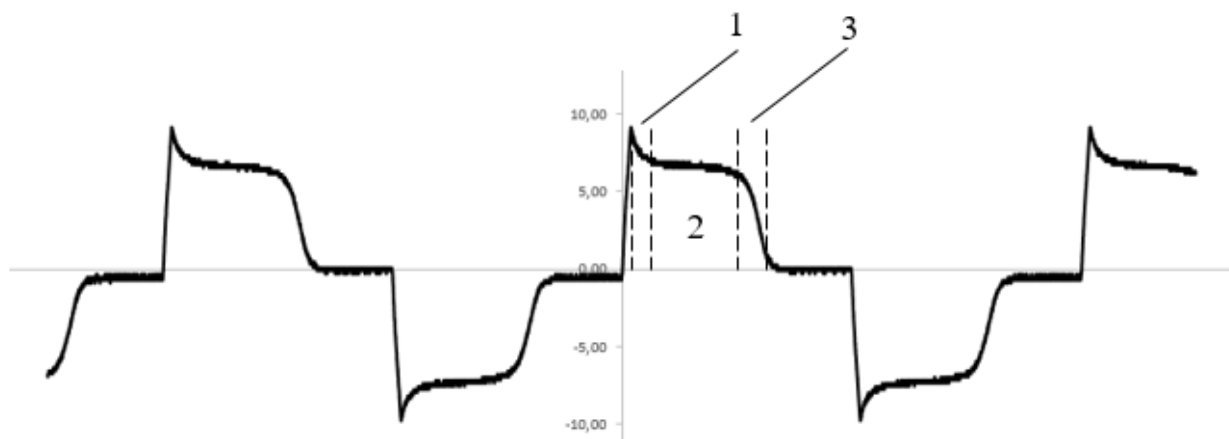


Рис. 8. Реальное напряжение на катушке. 1, 3 – области насыщения, 2 – область выхода из насыщения

Заметим, что наша теоретическая модель совпадает с реальным случаем. На рис. 8 отчетливо видны те же характерные области.

Сигнал был зарегистрирован с помощью следующей схемы. Феррозонд был помещен вместе с магнитометром в экранированный соленоид. С генератора Agilent 33250A [3] на катушку возбуждения подавался импульсный сигнал с частотой 50 кГц и амплитудой напряжения 8 В. С лабораторного генератора в соленоид подавался ток, с помощью чего и было установлено поле внутри него (для данного варианта на рис. 6 – 936 мТс).

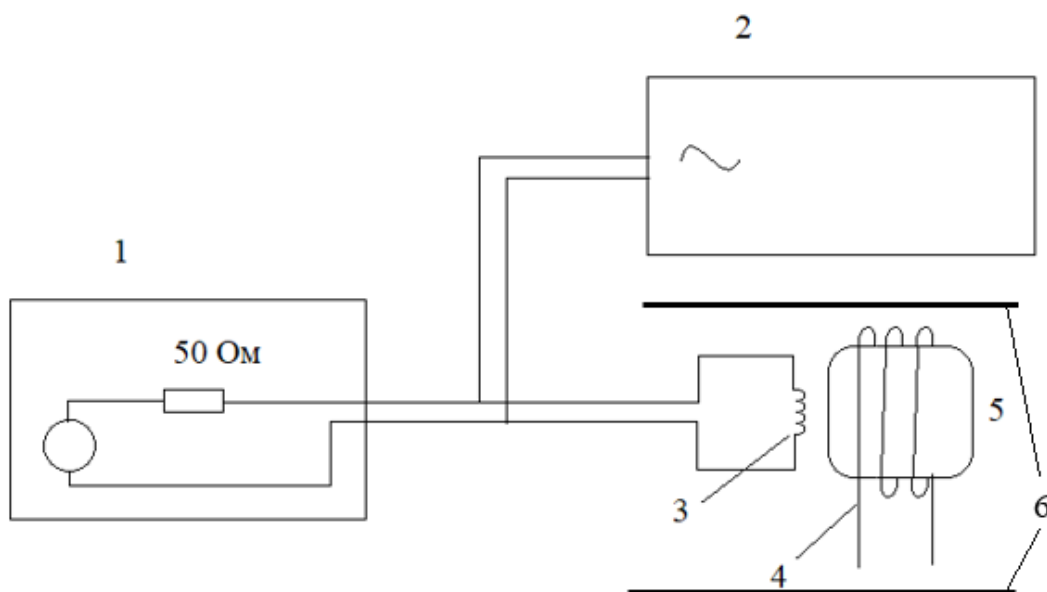


Рис.9. Схема установки. 1 – генератор, 2 – осциллограф, 3 – катушка возбуждения, 4 – катушка считывания, 5 – феррозонд, 6 – соленоид.

Работа катушки считывания

Катушка считывания намотана поверх сердечника и имеет прямоугольное сечение площадью S и содержит N витков. Магнитный поток через такую катушку можно обозначить как $\Phi_0 = BNS$, где B – компонента магнитного поля, перпендикулярная плоскости катушки. Идея работы феррозондового магнетометра основывается на том, что сердечник из ферромагнетика, вокруг которого намотана катушка возбуждения, концентрируют в себя силовые линии магнитного поля, создавая магнитный поток Φ_1 .

Можно ввести коэффициент уплотнения магнитных линий β как отношение:

$$\beta = \frac{\Phi_1}{\Phi_0} \quad (4)$$

Заметим, что в насыщенном состоянии, когда ток через катушку возбуждения превосходит величину $I_{нас}$ магнитная проницаемость сердечника становится равной 1 и силовые линии внутри него не концентрируются. Таким образом, подавая переменное напряжение на катушку возбуждения, получаем переменный магнитный поток через катушку считывания, пропорциональный внешнему магнитному полю, а значит и индукционное ЭДС, которое можно измерить.

Рассмотрим напряжение на измерительной катушке. Возьмем начальный момент времени T_1 тогда, когда напряжение на катушке возбуждения U_L начинает возрастать с $-U$. Тогда на катушке считывания образуется ЭДС в виде коротких импульсов, рис 10, б).

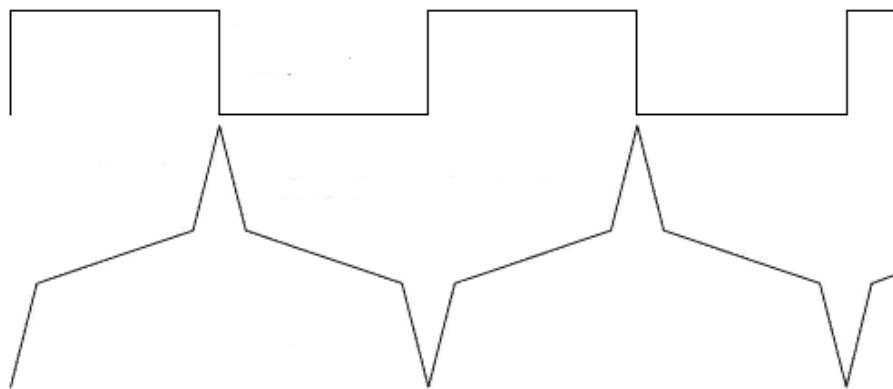


Рис. 10, а) Подаваемое напряжение и напряжение на катушке возбуждения.



Рис. 10, б) Напряжение на измерительной катушке

В начальный момент времени T_1 сердечник находится в насыщенном состоянии и поток через него составляет $\Phi_0 = BNS$. Постепенно ток в катушке возбуждения начинает понижаться и сердечник выходит из насыщенного состояния, поток через него, согласно (4), увеличивается в β раз. Следовательно, согласно закону Фарадея, $\frac{d\Phi}{dt} = -E_{ind}$, на измерительной катушке индуцируется напряжение E_{ind} . Если предположить, что разность потоков положительна, то появится напряжение с отрицательным значением. Это напряжение будет до тех пор, пока сердечник не выйдет из насыщенного состояния в момент времени T_2 , и поток через него не перестанет меняться, что мы и наблюдаем на рис. 10, б).

Форма сигнала - его длительность и амплитуда зависят от того, как проходит процесс намагничивания и размагничивания, однако интеграл сигнала пропорционален разности потоков.

Проинтегрировав от T_1 до T_2 это напряжение получим разность двух потоков:

$$\int_{T_1}^{T_2} U dt = -\Delta\Phi = \alpha B. \quad (5)$$

В (5) коэффициент α обозначим как чувствительность феррозондового датчика.

Далее аналогично, напряжение возрастает и сердечник переходит в состояние насыщения, поток уменьшается, следовательно, появляется напряжение с положительным знаком. Также заметим, что за данный полупериод сигнала на катушке возбуждения, прошел период на измерительной катушке, поэтому феррозондовый магнитометр работает на второй гармонике.

Из (4) и (5) следует, что

$$\alpha = \frac{\Phi_1 - \Phi_0}{B} = (\beta - 1)NS. \quad (6)$$

При отсутствии поля на измерительной катушке не должно появляться никаких сигналов, но в действительности можно увидеть, что сигнал будет.

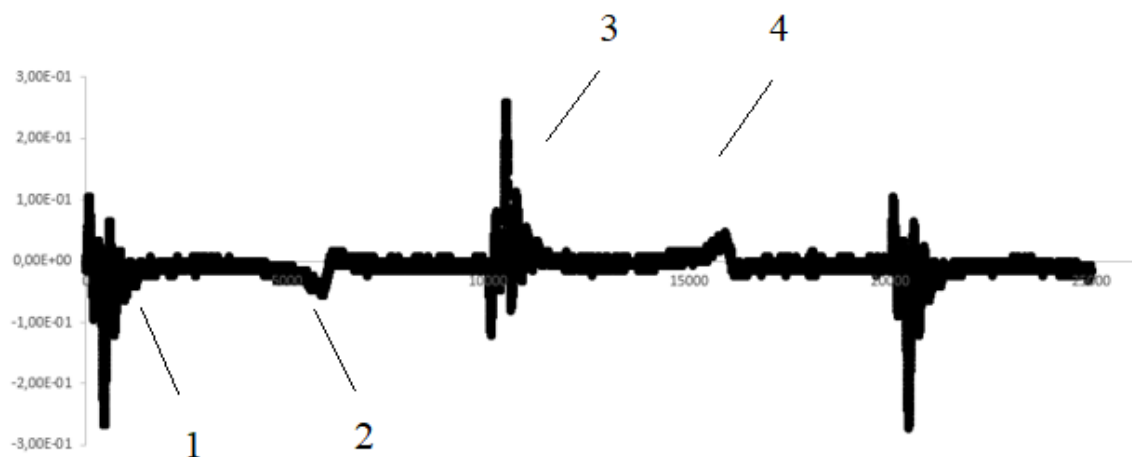


Рис. 11, а). Напряжение на измерительной катушке при нулевом внешнем поле.

Заметим, что напряжения на рис.11, а), на участках 1 и 3, а также 2 и 4 совпадают по модулю, но противоположны по знаку. Следовательно, можно исключить данную наводку, если разбить один период на рис.11, а) на четыре равные части и просуммировать их. Рассмотрим реальное напряжение на катушке считывания (см. рис 11, б).

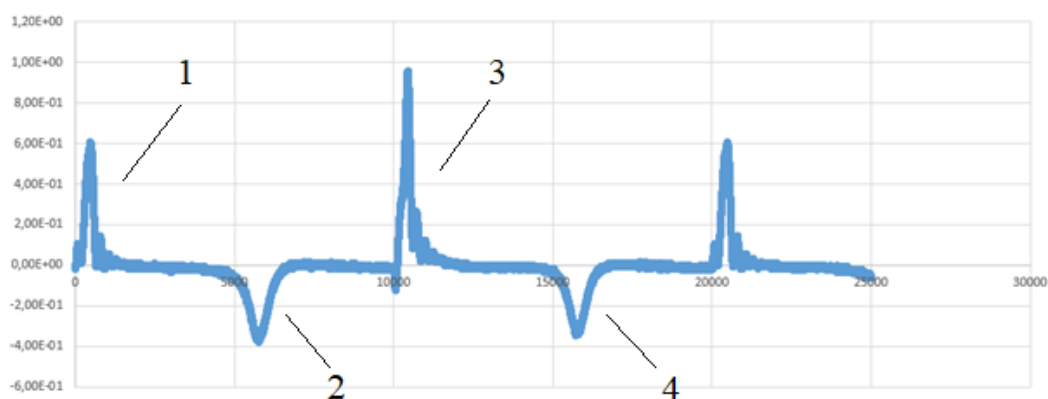


Рис. 11, б). Напряжение на измерительной катушке.

Если просуммировать площадь областей 1 и 3, и отнять площадь на 2 и 4, то в итоге получим учетверенный сигнал без каких-либо наводок, откуда и можно найти коэффициент чувствительности.

Результаты измерений

С помощью измерения напряжения на катушки считывания феррозонда была вычислена в таблице excel его чувствительность в зависимости от поля и от напряжения на катушке возбуждения. Предполагалось, естественно, что чувствительность не должна зависеть от этих величин. В таблицах 1 и 2 приведены результаты вычислений для разных по модулю и направленных в разных направлениях магнитных полей. По данным из таблиц 1 и 2 построен рис.12.

Таблица 1.

B_+ , мГс	936	723	502	380	266	98
α , m^2	0,0273	0,0275	0,0279	0,0273	0,0280	0,0276
β	2,37	2,38	2,40	2,37	2,40	2,38

Таблица 2.

B_- , мГс	937	724	505	268	100
α , m^2	0,00272	0,0271	0,0272	0,0267	0,0269
β	2,36	2,35	2,36	2,33	2,35

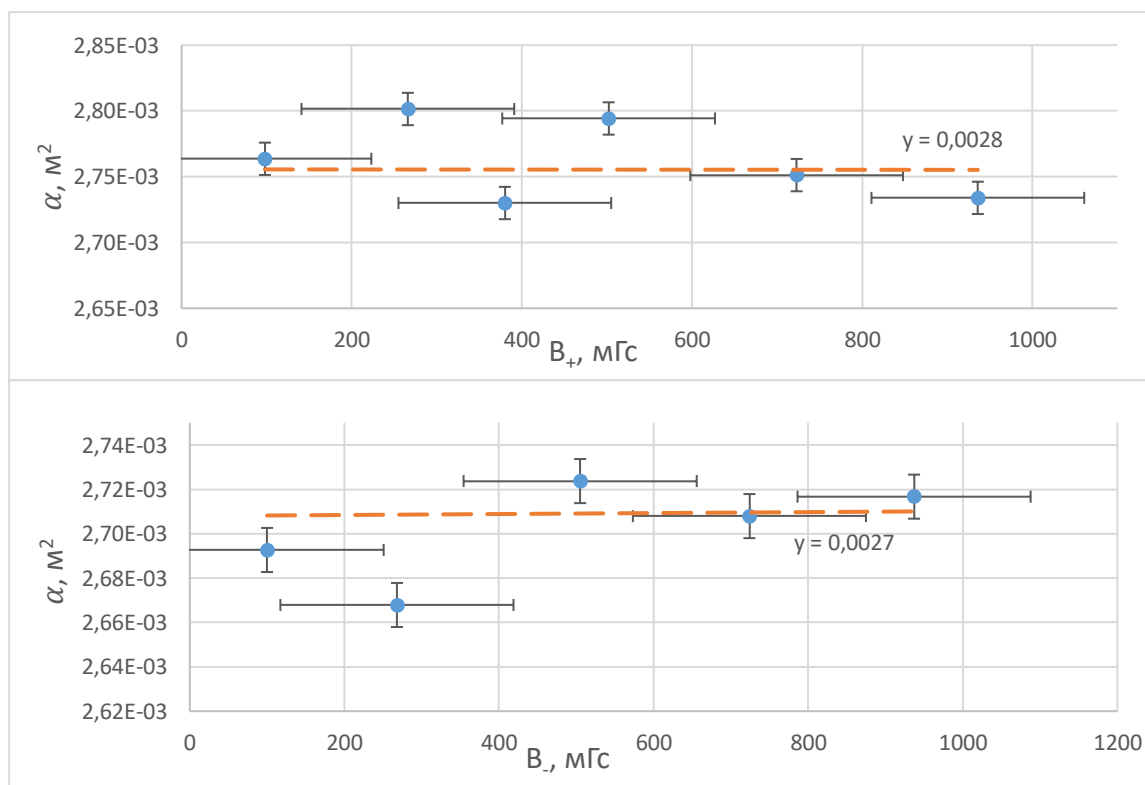


Рис. 12. Зависимость чувствительности от поля

В таблице 3 приведены вычисления чувствительности в зависимости от напряжения на катушке возбуждения. По таблице 3 построен рис.13.

Таблица 3.

U, В	1	2	3	4	5	6	7	8
α , м ²	0,0276	0,0268	0,0269	0,0270	0,0264	0,0268	0,0264	0,0271
β	2,38	2,34	2,34	2,35	2,32	2,34	2,32	2,35

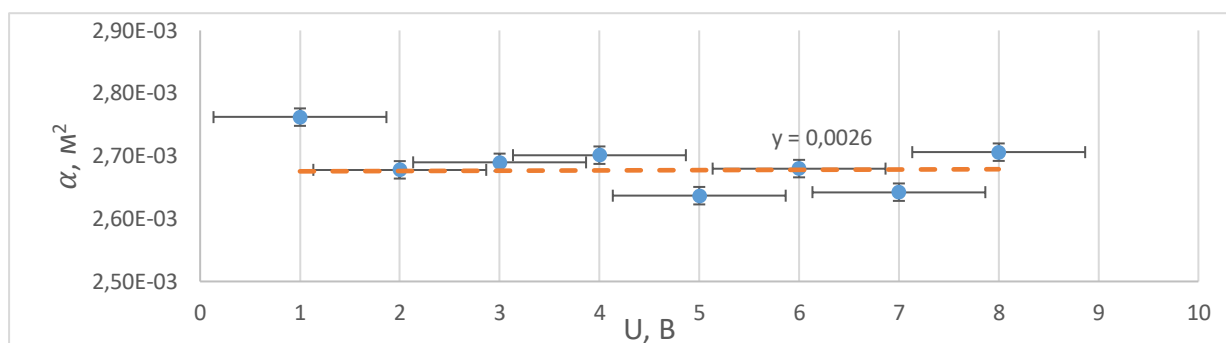


Рис.13. Зависимость чувствительности от напряжения

Итоговая величина чувствительности составила 0,0027 м², а коэффициент уплотнения силовых линий – 2,3.

Анализ погрешностей

Погрешность измерений складывается из погрешности считывания осциллографа, генератора, магнитометра и вычисления интеграла от напряжения по таблице excel. Также на данные могли повлиять не ровно закрепленные магнитометр с феррозондом внутри соленоида и малые поля внутри него.

Таблица 4.

Осциллограф DSO-X 2014A	Магнитометр COLIY GF-Y10	Генератор Agilent 33250A	Вычисление по таблице excel
±3%	±0,9%	±2%	±2.1%
Итоговая среднеквадратичная погрешность			
±4,2%			

Заключение

Вычисленное значение чувствительности феррозонда составило $0,0027 \text{ м}^2 \pm 4.2\%$, что согласовывается с паспортными данными феррозонда, которые составляют $0,0026 \text{ м}^2$. Для коэффициент уплотнения силовых линий получено значение $2,3 \pm 4.2\%$.

Также проверено, что чувствительность не зависит от поля и напряжения, что соответствует нашей модели.

Используемая литература

1. “Лента из аморфных и нанокристаллических сплавов марки 2НСР” - <http://xn--80aajzhcnfck0a.xn--p1ai/PublicDocuments/0621690.pdf>
2. “Магнитометр COLIY GF-Y10” - <https://www.directindustry.com.ru/prod/coliy-technology-gmbh/product-83131-1683582.html>
3. “Генератор сигналов сложной/произвольной формы Agilent 33250A” - <http://www.unitest.com/pdf/ag3325a.pdf>
4. “Цифровой осциллограф DSOX2014A” - <https://www.astena.ru/dsox2014a.html>
5. “Феррозондовые Преобразователи Магнитного Поля” - <http://guarda.ru/vibration/23/>
6. “Магнитометрия” - <https://acdc.foxylab.com/node/26>
7. “Феррозондовые магнитометры” - http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2012/v320/i4/18.pdf
8. Ю. В. Афанасьев “Феррозонды” - <http://bookre.org/reader?file=483182&pg=0>