

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Физический факультет

Кафедра общей физики

Дильмухаметов Георгий Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

Изучение явлений вихревых токов и магнитного трения

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №19306

Научный руководитель:

д.ф.-м.н. Терещенко О.Е.

Оценка научного руководителя

« _____ » _____ 20 г.

Преподаватель практикума

Солдаткина Е.И.

Оценка преподавателя практикума

« _____ » _____ 20 г.

Куратор практикума:

к.т.н. Астрелин В.Т.

Итоговая оценка

« _____ » _____ 20 г.

Новосибирск 2020

Аннотация:

Целью работы является экспериментальное изучение такого явления, как вихревые токи, также называемые «токами Фуко», и магнитного трения магнита при его падении в проводящих и непроводящих трубках. Для этих целей использовалась специальная установка с вертикальными трубками, состоящими из проводящих и непроводящих материалов, магнит и измерительные приборы.

Ключевые слова: токи Фуко, вихревые токи, магнитное трение.

Оглавление

1. Введение	4
2. Теоретическая часть	5
2.1 Движение магнитного диполя в проводящей трубе	5
2.2. Движение магнитного диполя в трубе с разрезом	7
3. Экспериментальная часть	8
3.1. Описание установки	8
3.2 Погрешности измерений	15
4. Вывод	16
5. Список литературы	16

1. Введение

Магнитное поле – это поле, действующее на движущиеся электрические заряды и тела, обладающие магнитным моментом. Сам термин «магнитное поле» был введен английским физиком-экспериментатором Майклом Фарадеем (22 сентября 1791 г. – 25 августа 1867 г.) в 1845 году. Проявления магнитного поля заметны в его воздействии на движущиеся заряды.

Также магнитное поле создает токи Фуко (вихревые токи), которые возникают в проводниках в процессе воздействия на них переменного магнитного поля. Токи Фуко возникают также при движении тела в магнитном поле. В 1824 году французский физик Д.Ф. Араго (26 февраля 1786 г. – 2 октября 1853 г.) провел эксперимент: на одной оси он расположил медный диск и магнитную стрелку, при вращении диска стрелка тоже начинала двигаться. Это явление вихревых токов назвали как «явление Араго». Вихревые токи называются «токами Фуко» благодаря физика Ж. Б. Л. Фуко (18 сентября 1819 г. – 11 февраля 1868 г.).



Рис. 1 Эксперимент Д.Ф. Араго

На практике токи Фуко широко распространены в различных отраслях промышленности, так, например, индукционные печи фактически произвели революцию в металлургии, значительно уменьшив отходы от производства металлов и изменив технологию плавки металлов. Так же они используются при производстве электровакуумных приборов для удаления газов перед герметизацией. Или же их применение можно обнаружить прямо у себя дома, так как вихревые токи используются в индукционных кухонных плитах для готовки. еды.

Помимо пользы вихревых токов, следует учитывать их негативные последствия, потому как, например, нагрев сердечника в трансформаторе может вызывать сильный нагрев, который приведет к разрушению изоляции и как следствие к проблемам в работе трансформатора, что решается изготовлением сердечников особой формы, а именно из нескольких тонких слоев в форме буквы «Е».

2. Теоретическая часть

2.1 Движение магнитного диполя в проводящей трубе

Для объяснения, что будет происходить с постоянным магнитом в проводящей трубе, его следует представить, как магнитный диполь, работать в цилиндрической системе координат и в системе СГС.

Во время падения магнита в трубе меняется магнитный поток, проходящий через сечение трубы, из-за чего, по закону электромагнитной индукции будут возникать вихревые токи.



рис. 2 Магнит в проводящей трубке

Эти вихревые токи будут создавать магнитное поле того же знака, что и магнит, из-за чего магнит будет тормозиться.

Для нахождения силы взаимодействия падающего магнита и магнитного поля, создаваемого токами Фуко, нужно воспользоваться следующей формулой:

$$F = (m * \nabla) B,$$

где \mathbf{m} – магнитный момент диполя, а \mathbf{B} – магнитное поле токов Фуко.

Эта сила зависит от скорости движения магнита, что приведет к компенсации силы тяжести силой торможения, а значит, возникновению некой постоянной скорости падения.

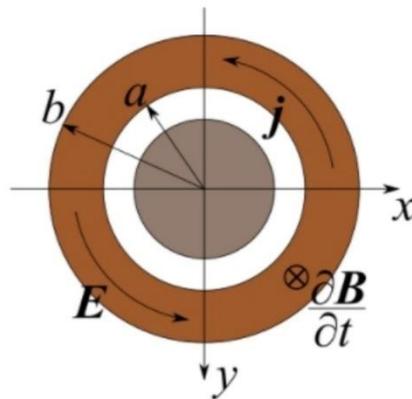


Рис. 3 Магнит в проводящей трубке
(вид сверху)

a – внутренний радиус трубы, b – внешний радиус трубы.

Из геометрических соображений ясно, что магнитное поле не будет иметь азимутальную компоненту $\mathbf{B}=(B_r, 0, B_z)$, а электрическое поле будет состоять только из азимутальной компоненты $\mathbf{E}=(0, E_\alpha, 0)$.

Для \mathbf{B} справедливо выражение $\mathbf{B}=\text{rot}\mathbf{A}$, а для $E_\alpha \dot{\alpha} \frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}$ где \mathbf{A} - векторный потенциал, который определяется следующей формулой:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{m} \times \mathbf{R}] / R^3$$

А тормозящая сила, действующая на магнит, находится так:

$$F = -\beta M \dot{z}_m$$

где $\beta = \frac{45\pi^2}{64} \cdot \frac{\sigma m^2 h}{Ma^4 c^2}$ – коэффициент магнитного трения, M – масса магнита, \dot{z}_m – мгновенная скорость магнита, a – внутренний радиус трубки, b – внешний радиус трубки, m – дипольный момент магнита, σ – проводимость материала трубки.

Решая уравнение движения магнита, можно получить зависимость его координаты от времени:

$$z_m(t) = \frac{gt}{\beta} - \frac{g - \beta v_1}{\beta^2} [1 - \exp(-\beta t)]$$

где v_1 - скорость в момент времени $t=0$.

Для трубок с высокой проводимостью магнит быстро достигнет постоянной скорости $v_{\infty} = g / \beta$, равной его скорости при прохождении через первую катушку. Отсюда находится коэффициент трения:

$$\beta = \frac{g}{v_{\infty}}.$$

Если вокруг трубы на некотором расстоянии друг от друга намотаны последовательно соединенные витки проволоки, то при прохождении магнита через витки на его концах будет возникать некое напряжение, определяемое следующей формулой:

$$U(t) = \frac{6\pi * p}{c} \sum_{i=1}^N \frac{mp(z_m(t) - z_i)}{(p^2 + (z_m(t) - z_i)^2)^{\frac{5}{2}}}$$

где $p = b + \frac{d}{2}$ – радиус измерительного витка, d – диаметр проволоки, z_i – координата i -того витка, m – магнитный момент магнита.

2.2. Движение магнитного диполя в трубе с разрезом

При падении магнита в трубе, состоящей из проводящего материала, но с продольным разрезом, азимутальный ток разрывается.

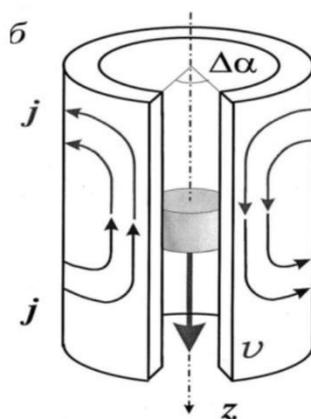


Рис. 4 Схема токов Фуко, при движении магнита в трубе с продольным разрезом

Но из-за этого эффект торможения все равно будет наблюдаться, т.к. полярность ЭДС в стенках трубки спереди и сзади магнита будет различна, благодаря чему вихревые токи, индуцированные электродвижущей силой,

замыкаются вблизи разреза как на схеме (рис.4). Электрический заряд будет распределяться на краях стенок так, чтобы токи проводимости замыкались.

Тогда в этом случае, без аксиальной симметрии, выражение для напряженности поля будет следующим:

$$\mathbf{E} = \frac{v}{c} \left(\frac{\partial A_\alpha}{\partial z} \right) \mathbf{e}_\alpha - \nabla \phi$$

где A_α – вектор-потенциал точечного магнитного диполя в пространстве, а ϕ – потенциал, создаваемый поверхностными зарядами. Так как для потенциала в этом случае будет отсутствовать радиальное электрическое поле, то в уравнении Лапласа остаются только производные по α и z , а переменная r меняется на радиус трубки a :

$$\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

Отсюда можно найти силу торможения магнита в проводящей трубе с разрезом, которая будет происходить в Q раз быстрее:

$$F = -\frac{45\pi^2}{64} \frac{\sigma v h m^2}{c^2 a^4} Q(\pi - \Delta\alpha / 2)$$

И так как $\Delta\alpha \leq 3\pi/2$, то функцию Q можно аппроксимировать следующим выражением:

$$Q(\pi - \Delta\alpha / 2) \approx 0,77 - 0,16\Delta\alpha$$

3. Экспериментальная часть

3.1. Описание установки

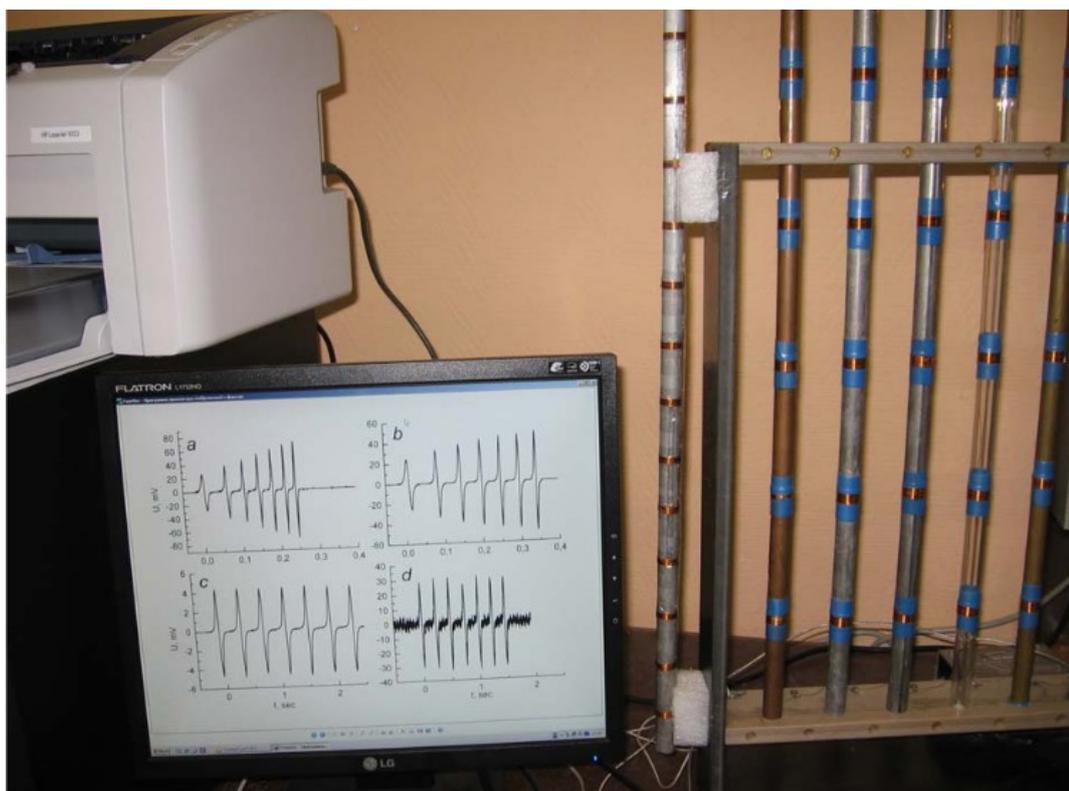


Рис. 5. Вид экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из набора вертикальных трубок длиной 80 см, сделанных из различных материалов, цилиндрического магнита, намагниченного вдоль оси. На трубки намотаны последовательно подключенные катушки. Напряжение на катушках регистрируется при помощи цифрового осциллографа.

На каждую трубку намотаны по 7 последовательно подключенных катушек с периодом 10 см, каждая из которых состоит из 20 витков и имеет длину 8 мм.

В результате измерений штангенциркулем были получены характеристики для следующих трубок:

Номер трубки	1 (медь)	2 (титан)	3 (алюминий)	4 (стекло)	5 (латунь)
Внутренний диаметр, мм	11.8	13	13	12.5	12
Внешний диаметр, мм	14.7	16	16.1	15	14.2
Толщина стенки h, мм	1.45	1.5	1.55	1.25	1.1

3.2 Результаты измерений и обработка результатов

Масса цилиндрического магнита составляет 5.16 ± 0.01 гр.

Для каждой трубки были проведены измерения и получены осциллограммы, приведенные на рисунках 6-10.



Рис. 6. Осциллограмма сигнала для медной трубки

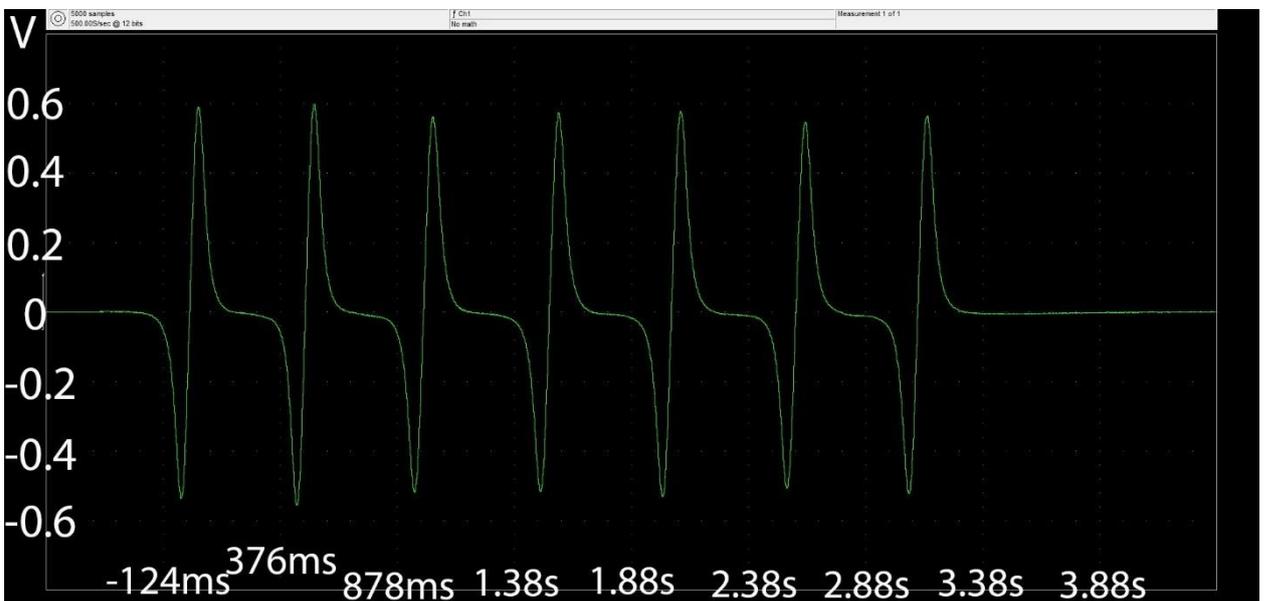


Рис. 7. Осциллограмма сигнала для титановой трубки



Рис. 8. Осциллограмма сигнала для алюминиевой трубки с продольным разрезом



Рис. 9. Осциллограмма сигнала для стеклянной трубки



Рис. 10. Осциллограмма сигнала для латунной трубки

Исходя из полученных данных, был построен график зависимости координаты от времени (рис. 11).

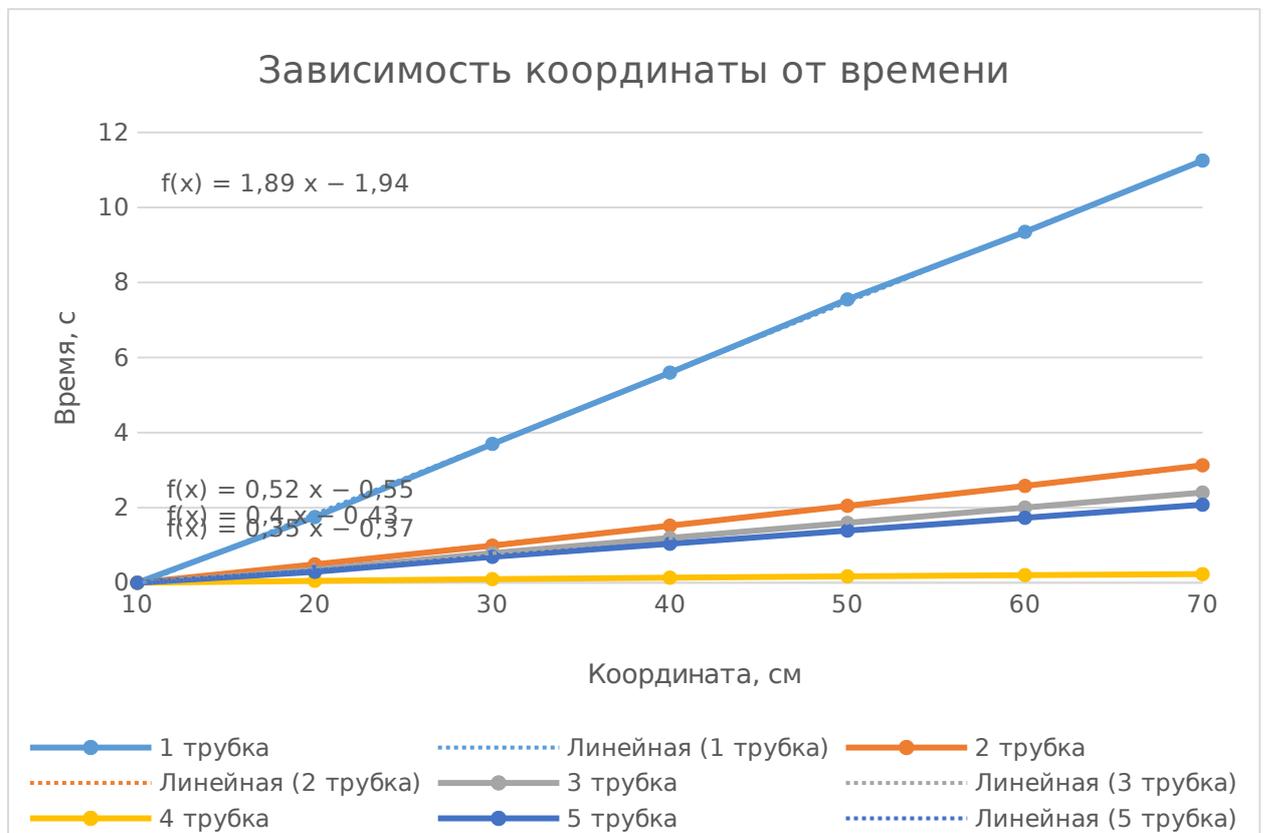


Рис. 11. Зависимость координаты магнита от времени для разных трубок

Из графика видно, что падение магнита в трубке 4 следует рассматривать как свободное падение тела в поле тяжести Земли, так как она сделана из непроводящего материала и явления магнитного трения нет. С помощью аппроксимации уравнений движения линейной функцией нахожу установившуюся скорость магнита.

Для трубок с высокой проводимостью магнит быстро достигнет постоянной скорости, поэтому можно легко вычислить коэффициент магнитного трения для медной трубки:

$$\beta_{Cu} = \frac{g}{v} = \sim 185 \text{ c}^{-1}$$

Из формулы для β можно выразить значение дипольного момента магнита:

$$m = \sqrt{\square}$$

Получив значение магнитного момента m , определяю при помощи осциллограмм проводимости материалов других трубок по следующим формулам:

$$\sigma = \frac{64 \beta M a^4 c^2}{45 \pi^2 m^2 h}$$

Полученные результаты для β и σ , а также магнитные моменты m :

	1 трубка	2 трубка	3 трубка	5 трубка
β , эксп	183	51.1	39.7	34
σ эксп, 1/с	$5.5 \cdot 10^{17}$	$2.8 \cdot 10^{16}$	$1.6 \cdot 10^{17}$	$1.35 \cdot 10^{17}$
σ табличное, 1/с	$5.3 \cdot 10^{17}$	$1.9 \cdot 10^{16}$	$1.74 \cdot 10^{17}$	$1.35 \cdot 10^{17}$
m , Эрг/Гс	438	461	409	445

Напряжение на катушках вычисляю при помощи следующей формулы:

$$U(t) = \frac{6\pi * p}{c} \sum_{i=1}^N \frac{mp(z_m(t) - z_i)}{(p^2 + (z_m(t) - z_i)^2)^{\frac{5}{2}}}$$

где $p = b + \frac{d}{2}$ – радиус измерительного витка, d – диаметр проволоки, z_i – координата i -того витка, $z_m(t)$ – координата магнита в момент времени t , рассчитанная по следующей формуле:

$$z_m(t) = \frac{gt}{\beta} - \frac{g - \beta v_1}{\beta^2} [1 - \exp(-\beta t)]$$

где v_1 – скорость в момент времени $t=0$.

Изменяя коэффициенты ν_1 и β , добиваясь наибольшего соответствия периода, а меняя m – амплитуды функции $U(t)$ и экспериментальной зависимости с осциллографа:

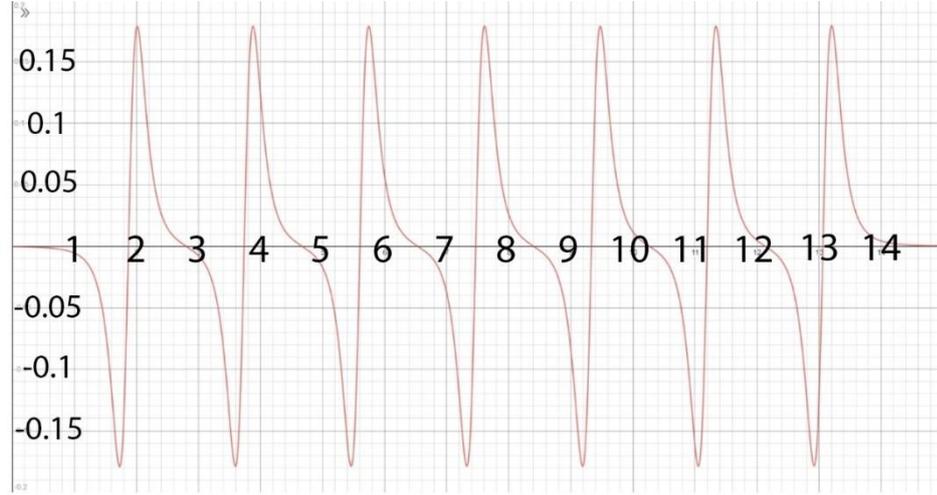


График зависимости U(t) для 1 трубки

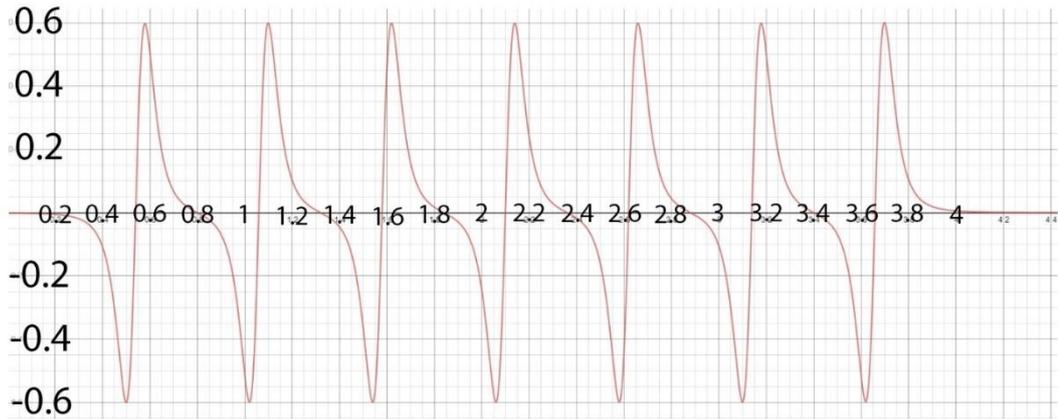
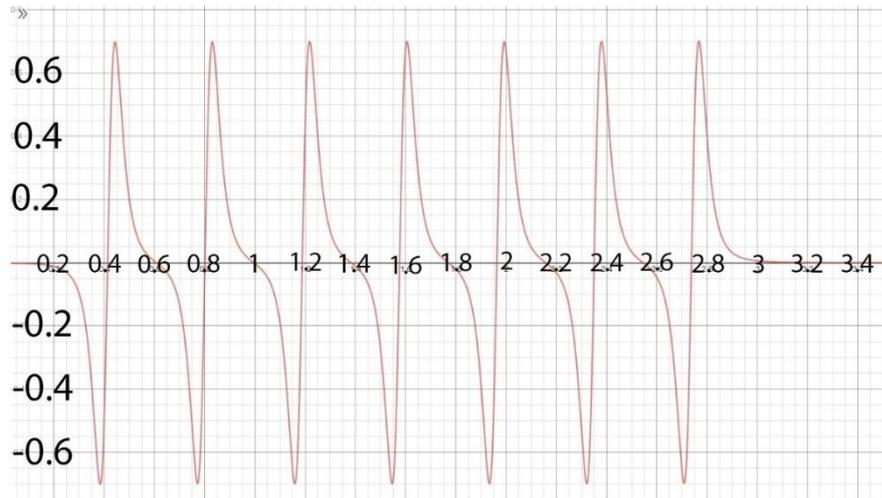


График зависимости U(t) для 2 трубки

График зависимости $U(t)$ для 3 трубкиГрафик зависимости $U(t)$ для 5 трубки

Полученные в ходе подбора коэффициентов значения:

	1 трубка	2 трубка	3 трубка	5 трубка
β	183	51	38	34
Вычисленный m , Эрг/Гс	438	462	409	445
m , Эрг/Гс	430	440	427	443

3.2 Погрешности измерений

Погрешности при измерении диаметров трубок штангенциркулем составляют $\pm 0,2$ мм. При измерении веса магнита погрешность составила $\pm 0,05$ гр. Погрешности осциллографа по времени и напряжению $\pm 2\%$.

Изучив вычисления, был сделан вывод что наибольший вклад в погрешности давала величина h , которая зависит от диаметров трубок. Погрешность измерения проводимости трубок составила $\pm 15\%$. Погрешность вычислений магнитного момента составила $\pm 20\%$.

4. Вывод

В ходе выполнения работы было исследовано явление вихревых токов и явление магнитного трения на примере торможения магнита, падающего в поле тяжести в проводящих трубках, а также были экспериментально определены магнитный момент магнита и проводимости материалов трубок.

5. Список литературы

- 1) Учебно-методическое пособие Князев Б.А. НГУ 2008г. 63 стр. (http://www.phys.nsu.ru/electricity/text/EMLab_Laboratory_practical_6_Knyazev_B_A_KOF_NGU_2008_63s.pdf)
- 2) https://elmag.nsu.ru/doku.php?id=lab6:эксперимент63#экспериментальная_установка
- 3) [https://elmag.nsu.ru/doku.php?id=lab6:теория_63&s\[\]=6&s\[\]=3](https://elmag.nsu.ru/doku.php?id=lab6:теория_63&s[]=6&s[]=3)
- 4) https://ru.wikipedia.org/wiki/Вихревые_токи
- 5) <https://www.asutpp.ru/vixrevye-toki.html>
- 6) http://www.eliks.ru/info/index.php?ELEMENT_ID=8873
- 7) https://ru.wikipedia.org/wiki/Магнитное_поле
- 8) <https://habr.com/ru/post/490310/>