

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

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

Физический факультет

Кафедра автоматизации физико-технических исследований

Пищев Иван Евгеньевич

КУРСОВАЯ РАБОТА

«Измерение характеристик электромагнитного профилометра»

Электромагнитный практикум, 2 курс, группа №18345

Научный руководитель:

г.н.с. д.ф.-м.н академик В.В.
Пархомчук

Оценка научного руководителя

«_____» _____ 20__ г.

Преподаватель практикума:

Оценка преподавателя практикума

«_____» _____ 20__ г.

Куратор практикума:

Итоговая оценка

«_____» _____ 20__ г.

Измерение характеристик электромагнитного профилометра

Пищев Иван Евгеньевич

Физический факультет. Электромагнитный практикум. Курсовая работа.

Группа №18345, 3 семестр, 2019 год.

Научный руководитель:

Главный научный сотрудник ИЯФ СО РАН, доктор физико-математических наук, Василий Васильевич Пархомчук.

Аннотация

Целью работы было измерение характеристик электромагнитного профилометра, используемого для исследования расположения частиц в пучке. Электромагнитный профилометр был помещен в магнитное поле, создаваемое двумя магнитами. С помощью осциллографа были проведены измерения частоты колебаний перемычек профилометра, и ЭДС индукции возникающая в перемычках. Для исследования зависимости амплитуды и частоты колебания от тока использовался генератор синусоидального сигнала. Полученные данные обработаны с помощью программ MathCad и Microsoft Excel. Измерения были проведены в Институте Ядерной Физики имени Г. И. Будкера СО РАН, в лаборатории 5.2.

Ключевые слова: электромагнитный профилометр, ЭДС индукции.

Оглавление

1.Введение -----	3
2.Описание электромагнитного профилометра -----	4
3.Экспериментальная часть -----	5
4.Результаты -----	13
Список литературы -----	13

Введение.

Электромагнитный профилометр – это устройство, спроектированное и созданное в Институте Ядерной Физики имени Г.И.Будкера, позволяющее исследовать расположение частиц в пучке, другими словами – измерить профиль пучка. Находясь в магнитном поле, при подаче на электромагнитный профилометр ток, перемычки в профилометре под действием силы Ампера начинают колебаться с некоторой частотой, препятствуя движению частиц в пучке (рис. 1).

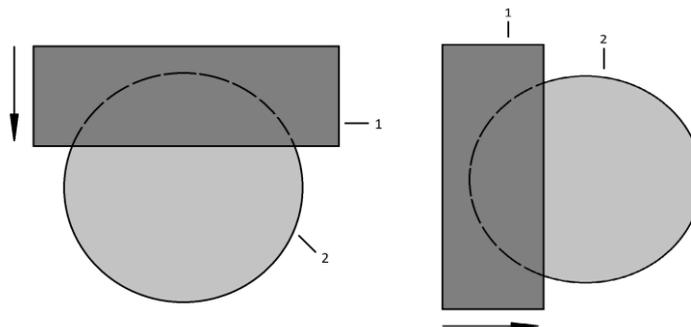


Рисунок 1. 1-перемычки; 2-пучок

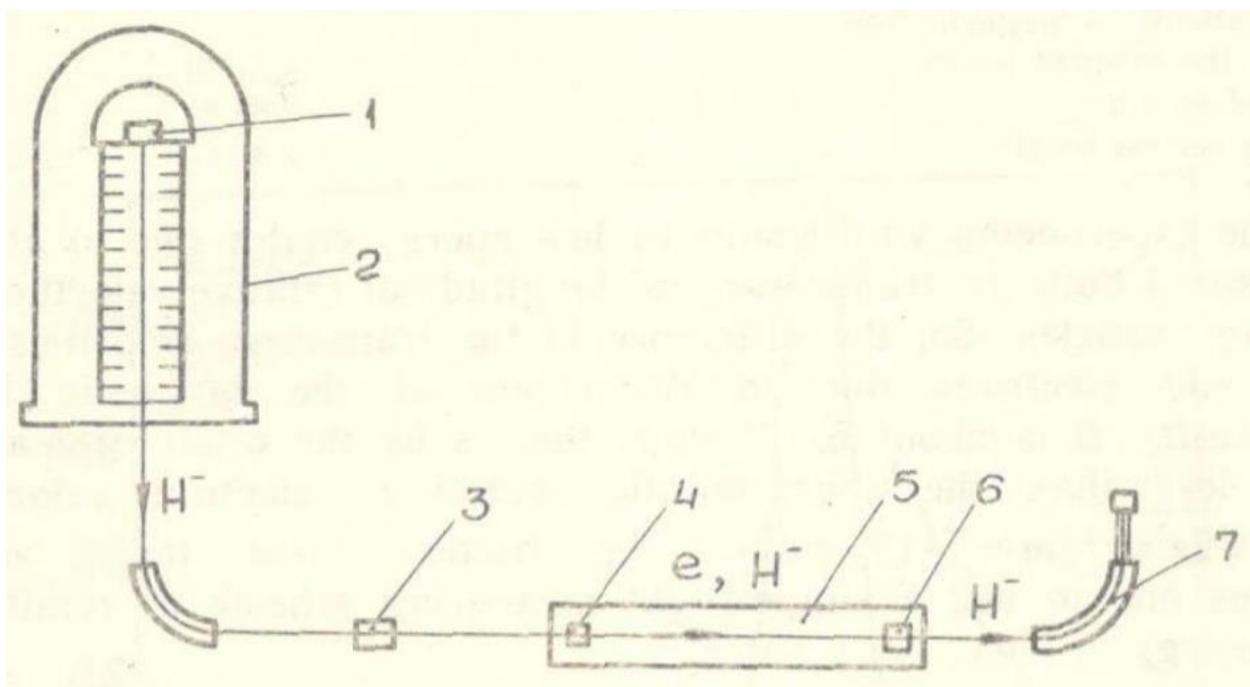


Рисунок 2.Схема установки “Модель соленоида”. 1-источник H^- ; 2- ускоритель; 3-мишень паров магния; 4-электронный излучатель; 5-соленоид; 6 – коллектор; 7-спектрометр.

Использование электромагнитного профилометра можно продемонстрировать на примере установки на рисунке 2. Профилометр в ней расположен в соленоиде, между электронным излучателем и коллектором. Из электронного излучателя пучок H^- подается на коллектор, тогда по зависимости тока на коллекторе от времени, можно определить профиль

частиц. Перемещая электромагнитный профилометр между электронным излучателем и коллектором, можно также получить зависимость плотности расположения частиц в пучке от расстояния.

В данной работе будут исследованы характеристики электромагнитного профилометра: зависимость амплитуды колебания перемычек от напряжения, подаваемого на электромагнитный профилометр, и частота колебания перемычек.

Описание электромагнитного профилометра

Электромагнитный профилометр представляет собой металлический каркас с двумя тонкими, соединенными между собой перемычками длиной 2 см, способными совершать колебания с некоторой амплитудой. Перемычки расположены перпендикулярно направлению пучка, а также перпендикулярно относительно друг друга, что позволяет измерить профиль пучка по оси X и Y. Через отверстия в приборе, проходит пучок. Схема электромагнитного профилометра представлена на рисунке 3.

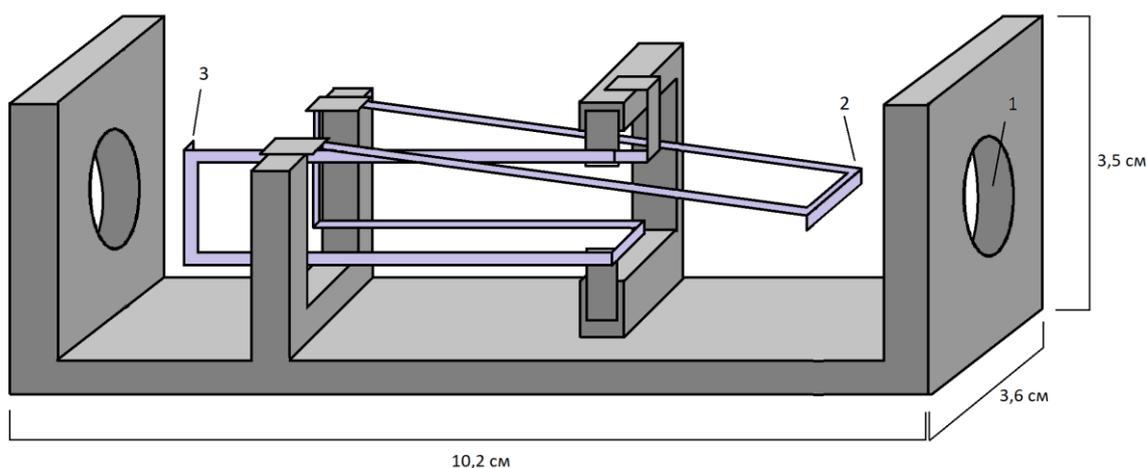


Рисунок 3. Схема электромагнитного профилометра. 1-область для пропускания пучка (диаметр 1.5см); 2,3-перемычки.

Если подать на электромагнитный профилометр ток, и поместить профилометр в магнитное поле, то на перемычки будет действовать сила Лоренца, при подаче тока нужной частоты достигается резонанс, и перемычка начинает колебаться. В данной работе магнитное поле было создано с помощью двух магнитов, закрепленных на внешней стороне стенки с отверстием. Рассмотрим в таком случае силу Ампера.

$$F_{ам} = B \cdot I \cdot L \cdot \sin\alpha \quad (1)$$

Где α – угол между направлением тока и вектором магнитной индукции.

В нашем случае сила Ампера будет действовать только на перемычки.

Для перемычки $\sin\alpha = 1$. В соединяющих перемычку элементах сила Ампера направлена так, что деформирует саму рамку, в отношении колебаний эти компоненты несущественны, кроме того, токи в этих элементах направлены противоположно, следовательно, силы так же направлены в противоположные стороны, и компенсируют друг друга.

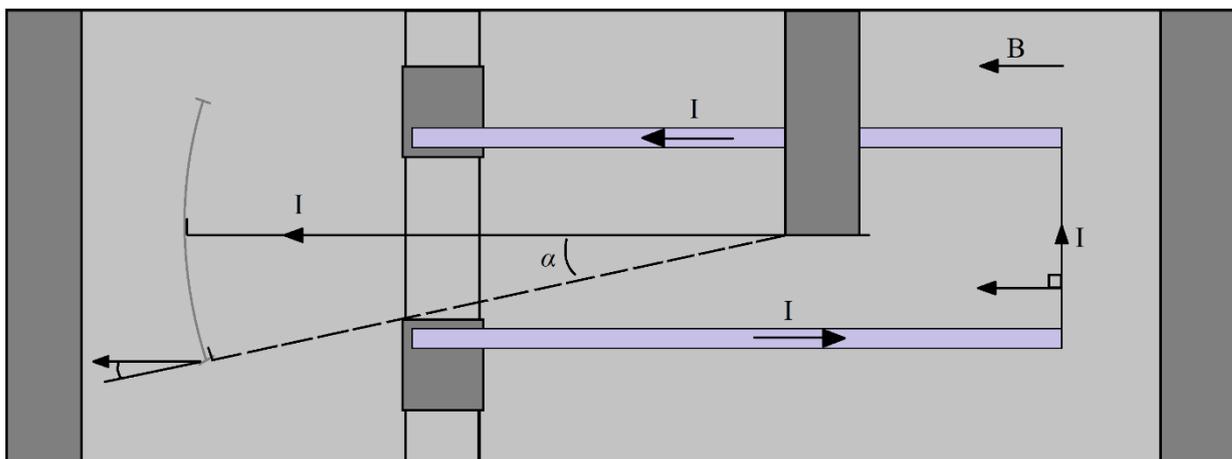


Рисунок 4. Вид электромагнитного профилометра сверху. Ток в электромагнитном профилометре. I – ток в перемычках и соединяющих их элементах. B – вектор магнитной индукции.

Экспериментальная часть

Часть первая

Целью первой части было исследование частоты колебания перемычек, амплитуды и коэффициента затухания, а также измерение магнитного поля, создаваемого магнитами. Для эксперимента была собрана схема, изображенная на рисунке 5.

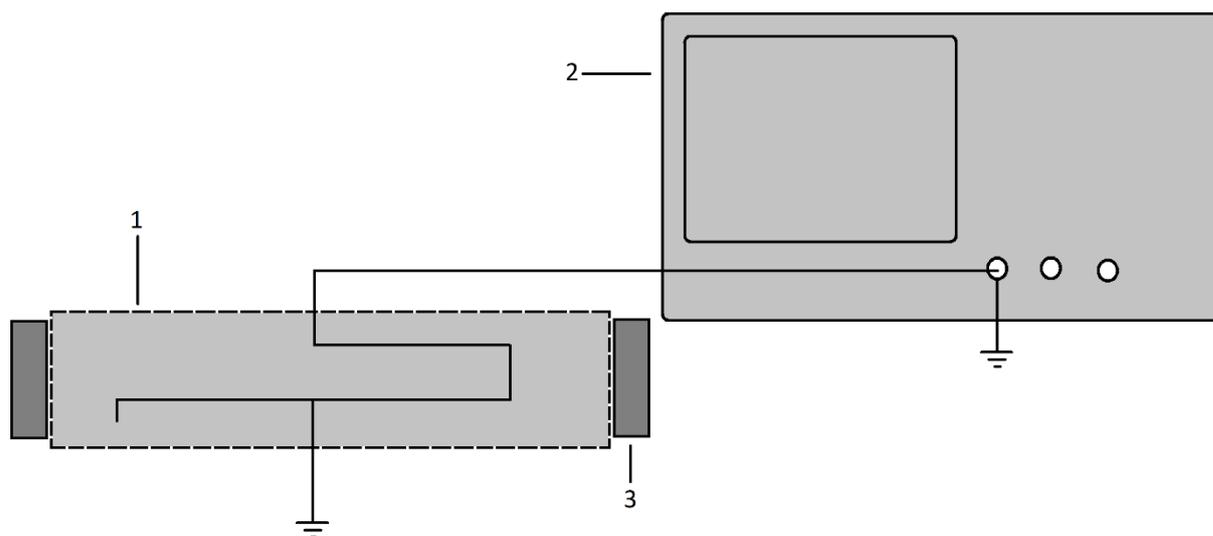


Рисунок 5. 1-электромагнитный профилометр; 2-осциллограф; 3-магниты.

При колебании перемычек, находящихся в магнитном поле, в них возникает ЭДС самоиндукции, величину которого можно получить из закона Фарадея:

$$\varepsilon_i = \frac{-d\Phi}{dt}$$

Где Φ – магнитный поток.

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\beta$$

β – угол между вектором магнитной индукции и нормалью к поверхности контура, через который проходит магнитный поток (см. рис.6). В данной ситуации воспользуемся приближением, в связи с малостью изменения угла β при колебании перемычек, будем считать $\cos\beta \approx 1$. Кроме того, такое приближение позволяет нам пренебречь магнитным потоком через элементы соединяющие перемычки, так как $\cos\alpha \approx 0$ (см. рис.6).

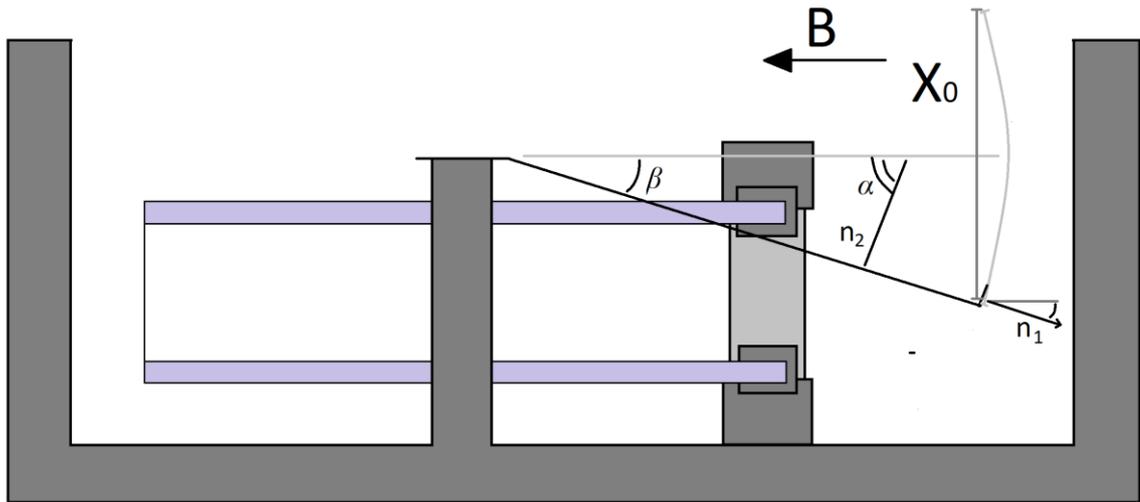


Рисунок 6. Вид электромагнитного профилометра в профиль. Отклонение перемычки от состояния равновесия на X_0 . B – вектор магнитной индукции; n_1 , n_2 – векторы нормали к поверхностям, через которые проходит магнитный поток.

Тогда

$$\Phi = B \cdot l \cdot x$$

Где l – длина контура. В данном случае длина перемычки. $l = 2$ см.

x – ширина контура.

$$\frac{d\Phi}{dt} = B \cdot l \cdot v$$

v – скорость движения проводника.

Тогда ЭДС самоиндукции возникающее в перемычке:

$$\mathcal{E}_i = B \cdot l \cdot v \quad (2)$$

Если подключить осциллограф в соответствии со схемой на рис. 5 и отпустить перемычку, предварительно отклонив ее от положения равновесия на некоторое X_0 , можно получить осциллограмму колебаний с затуханием (см. рис. 7).

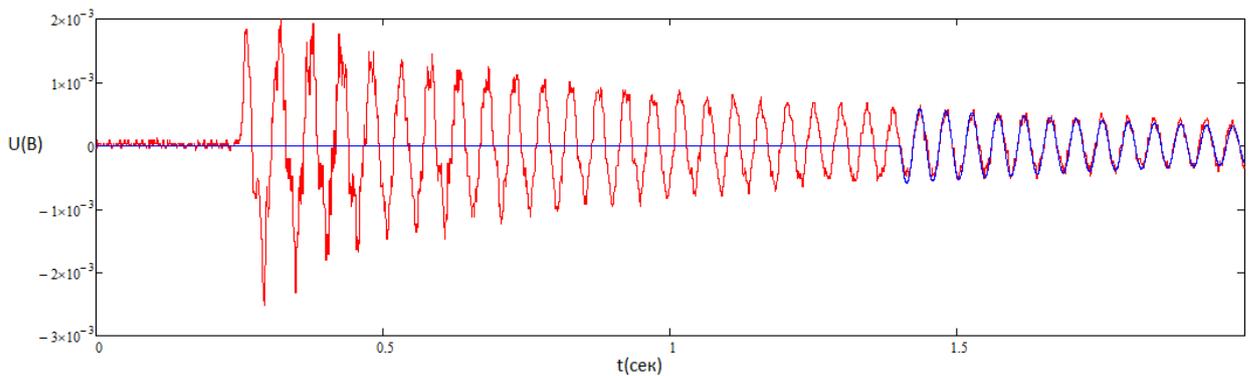


Рисунок 7. Вид осциллограммы колеблющейся перемычки

Уравнение затухающих колебаний:

$$\ddot{x} + 2\beta \cdot \dot{x} + \omega^2 \cdot x = 0$$

Его решение:

$$x = A \cdot e^{-\beta \cdot t} \cdot \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (3)$$

Где A – максимальная амплитуда, β – коэффициент затухания, ω – циклическая частота, φ_0 – начальная фаза. Время релаксации:

$$\tau = 1/\beta$$

Таким образом, подставляя подобранные коэффициенты в формулу 3, и сравнивая полученный график с исходным, можно получить значения ω , τ , A . Подобранный график выделен синей линией на рисунке 7. Значения ω , τ , A были подобраны для начала колебаний и конца.

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

Перемычка	X_0 (см)	τ	f (Гц)		Перемычка	X_0 (см)	τ	f (Гц)
НЧ	1	1,2	10		НЧ	1	1,2	13,5
НЧ	1,5	1,2	11,05		НЧ	1,5	1,2	13
ВЧ	1	1,3	21		ВЧ	1	1,3	22,3
ВЧ	1,5	1,3	19,5		ВЧ	1,5	1,3	22

1а.

1б.

Таблица 1. Значение времени релаксации и частоты. 1а – начало колебаний; 1б – конец колебаний. НЧ – перемычка с меньшей частотой; ВЧ – перемычка с более высокой частотой; X_0 – максимальная амплитуда колебания перемычки; τ – время релаксации; f – частота.

Из таблицы 1 видно, что значение частоты при затухании меняется, это объясняется нелинейностью колебаний перемычки.

Для нахождения максимальной скорости, воспользуемся приближением и рассмотрим в начальный момент времени колебание переключки как незатухающее. Уравнение свободных колебаний имеет вид:

$$\ddot{x} + \omega^2 \cdot x = 0$$

Решение данного уравнения:

$$x = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_0) \quad (4)$$

Так же могло бы быть получено, при подстановке в (3) $\beta=0$.

Продифференцировав (4) получим скорость движение переключки:

$$v = A \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

Откуда максимальная скорость:

$$v_{max} = A \cdot \omega \quad (5)$$

Используя данные с осциллографа, по формуле (2) можно получить магнитное поле.

Переключка	f(Гц)	X ₀ (м)	V _{max} (м/с)	U(В)	B(Тл)
НЧ	10	0,01	0,63	0,00061	0,049
НЧ	11,05	0,015	1,04	0,0011	0,053
ВЧ	21	0,01	1,32	0,0013	0,049
ВЧ	19,5	0,015	1,84	0,0019	0,052

Таблица 2. Измерение магнитного поля. f – частота; X₀ – максимальная амплитуда колебания переключки; U – напряжение на переключке; B – магнитное поле.

Часть вторая

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 8.

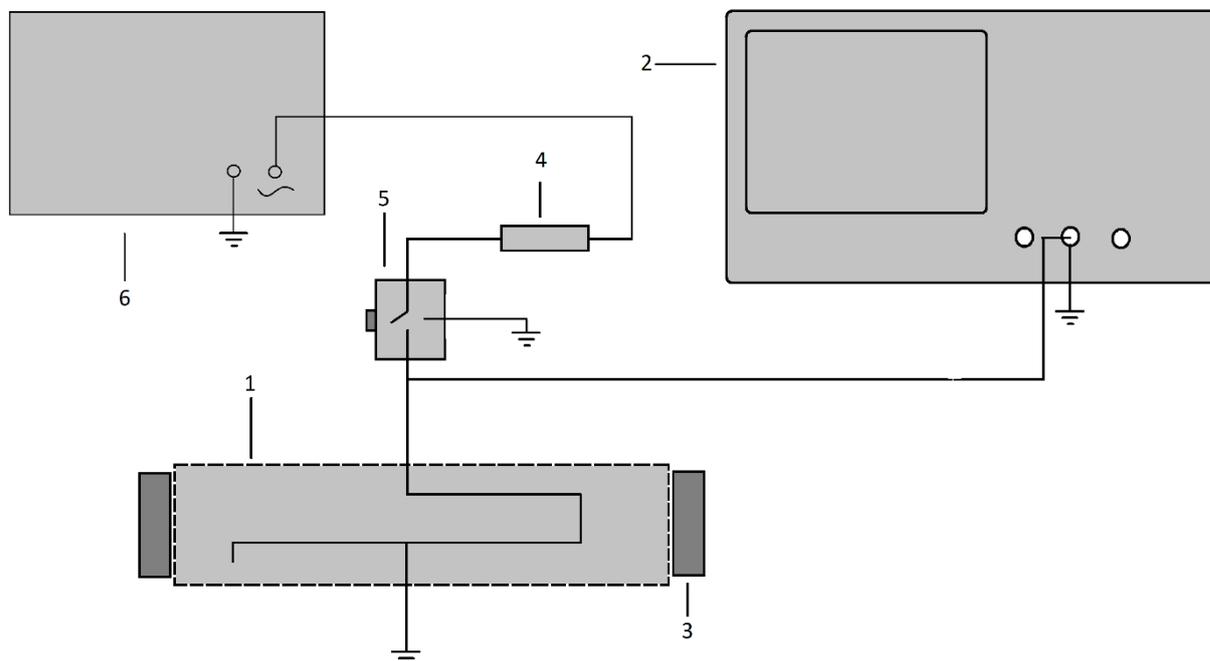


Рисунок 8. Измерение амплитуд и частот электромагнитного профилометра при подключении к генератору синусоидальных сигналов. 1 – электромагнитный профилометр; 2 – осциллограф; 3 – магниты; 4 – резистор; 5 – микрореле; 6 – генератор синусоидальных сигналов.

При подаче синусоидального сигнала на электромагнитный профилометр сила Ампера, действующая на перемычку, с некоторой частотой меняет направление на противоположное. Таким образом при выборе определенных частот можно достигнуть резонанса. При этом, если через перемычки протекает одинаковый ток, то в связи с тем, что частоты колебания перемычек отличаются, достичь резонанса одновременно на обеих невозможно, следовательно, ЭДС индукции будет возникать только в одной перемычке. Это в дальнейшем потребуется, при обработки данных, полученных с осциллографа.

По закону Фарадея, в соответствии с формулой (2) по перемычке будет также протекать ток самоиндукции. При сравнении сигнала с генератора и с профилометра трудно найти различия, чтобы рассмотреть ток самоиндукции. Для этого в схеме размещен микрореле (концевик).

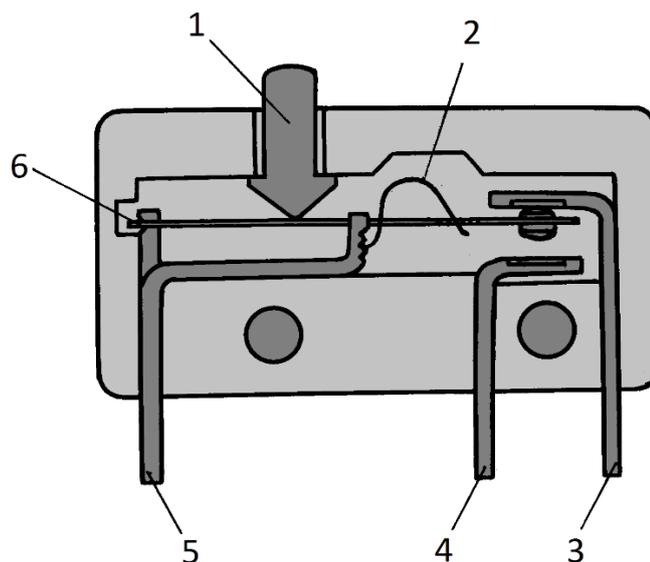


Рисунок 9. Схема микропереключателя. 1 – приводной элемент; 2 – рабочая пружина; 3, 4, 5 – неподвижные контакты; 6 – контактная пластина.

При действии на приводной элемент, контактная пластина прогибается, сжимая рабочую пружину. При переходе контактной пластины через критическую точку происходит переход пластины с контакта 3, и замыкание на контакте 4.

Таким образом обеспечивается быстрый переход от сигнала, подаваемого с генератора, к сигналу с уже свободно колеблющейся перемычки.

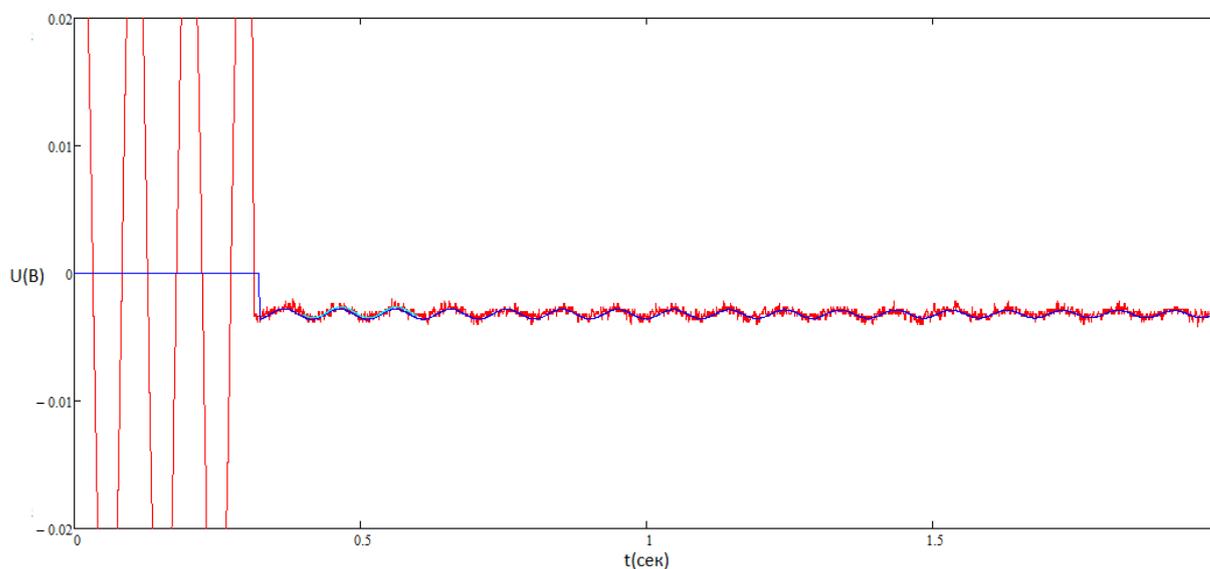


Рисунок 10. Оциллограмма при переходе от вынужденных колебаний к свободным.

На рисунке 10 показан переход от сигнала с генератора к сигналу свободных колебаний перемычки. Для нахождения частоты, амплитуды и времени релаксации, воспользуемся методом из первой части, однако, в связи с тем, что амплитуда колебаний меньше, для более точного определения

коэффициентов используем метод наименьших квадратов. На рисунке 10 синим цветом обозначен подобранный график, красным – искомый, полученный с осциллографа. Тогда увеличение точности коэффициентов будет при минимизации функции S:

$$S = \sum_L (signal1(x) - signal2(x))^2$$

Где signal1 – сигнал с осциллографа; signal2 – сигнал с подобранными коэффициентами.

Сопротивление резистора в цепи на рисб. 54,3 Ом. Сопротивление электромагнитного профилометра 0,245 Ом.

При последовательном подключении, ток по резистору и профилометру протекает один.

$$I = \frac{U}{R1+R2}$$

Где R1 и R2 – сопротивления резистора и профилометра; U – напряжение с генератора.

Перемычка	f(Гц)	X ₀ (см)	U(В)	I(A)
ВЧ	21,7	0,74	16	0,29
ВЧ	21,5	0,68	13,4	0,25
ВЧ	21,5	0,64	10,9	0,20
ВЧ	22,2	0,5	7,8	0,14
ВЧ	22,3	0,4	6,3	0,12
ВЧ	22,3	0,37	5,8	0,11
ВЧ	22,4	0,35	4,4	0,08
НЧ	10,5	1,51	16,4	0,30
НЧ	11,16	1,5	16,1	0,30
НЧ	10,35	1,4	8	0,15
НЧ	10,4	1,37	6,4	0,12
НЧ	10,5	1,1	4,8	0,09
НЧ	9,6	0,8	3,8	0,07
НЧ	9,9	0,64	2,2	0,04
НЧ	9,65	0,4	1	0,02

Таблица 3. Резонансные частоты и амплитуды колеблющихся перемычек. f – частота на генераторе; X₀ – амплитуда колебания перемычки; U – напряжение на электромагнитном профилометре.

Результаты

Частота колебания перемычек равна 10 ± 1 Гц и 21 ± 2 Гц. На графике 1 представлены результаты зависимости амплитуды от тока в магнитном поле $0,5 \pm 0,02$ Тл. Отметим, что график нелинейный, что может объясняться формой крепления перемычки, и ее строением.

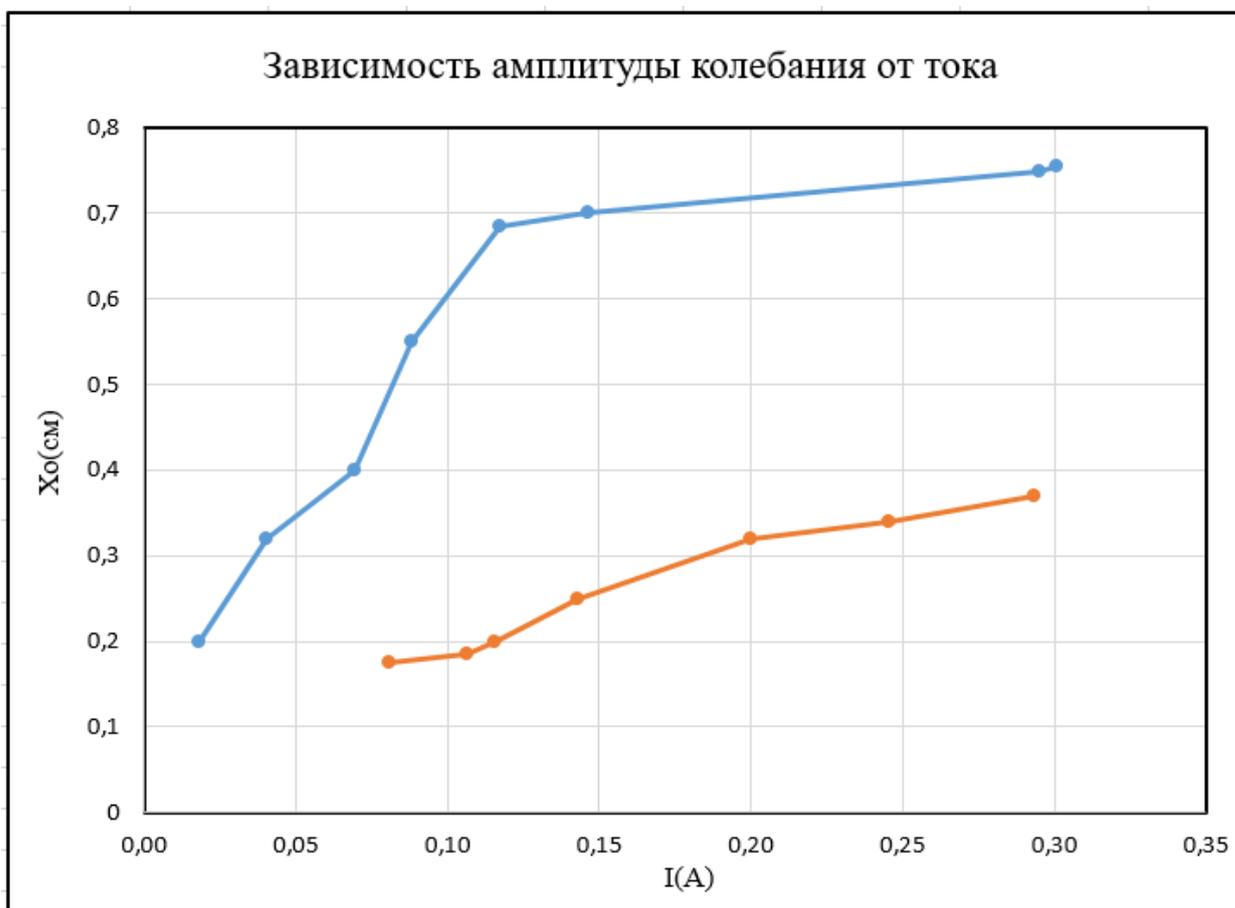


График 1. Зависимость амплитуды колебаний перемычки от тока. Синим цветом помечен график для НЧ, красным – для ВЧ.

Список литературы:

1. Диканский Н.С, Лебедев В.А, Мешков И.Н., Пархомчук В.В. Preprint 88-61, Ultimate possibilities of electron cooling. Новосибирск: ИЯФ СО РАН, 1988.
2. Яковлев В.И. Классическая электродинамика. Часть 1. Электричество и магнетизм. Новосибирск: КОФ НГУ, 2003.