

# Отчет по лабораторной работе №2: "Гистерезис"

Никитин Илья

1 октября 2020 г.

## Содержание

<b>1</b>	<b>Оборудование</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Задачи</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Определение индуктивности катушки</b>	<b>2</b>
3.1	Теория работы . . . . .	2
3.2	Ход работы . . . . .	3
3.3	Обработка данных . . . . .	4
<b>4</b>	<b>Гистерезис</b>	<b>5</b>
4.1	Теория работы . . . . .	5
4.2	Ход работы . . . . .	6
4.3	Анализ данных . . . . .	7
4.3.1	Первая схема . . . . .	7
4.3.2	Ход работы . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Генератор Ван Дер Граафа</b>	<b>9</b>
5.1	Оборудование . . . . .	9
5.2	Задачи . . . . .	9
5.3	Измерение тока генератора . . . . .	9
5.3.1	Теория работы . . . . .	9
5.3.2	Ход работы . . . . .	10
5.4	Определение напряжения пробоя воздуха . . . . .	11
5.4.1	Теория работы . . . . .	11
5.4.2	Ход работы . . . . .	12
5.5	Оценка напряжений генератора . . . . .	13
5.5.1	Теория работы . . . . .	13

5.5.2	Ход работы . . . . .	13
-------	----------------------	----

## 1 Оборудование

- Цифровой осциллограф Rigol со встроенным генератором синусоидального напряжения
- ЛАТР
- Понижающий трансформатор
- Клемник для сборки электрических цепей
- Ферритовый сердечник
- Резистор с сопротивлением 100 мОм
- Резистор с сопротивлением 95 Ом
- Резистор с сопротивлением 792 кОм
- Конденсатор емкостью около 1 мкФ
- Толстая медная проволока

## 2 Задачи

- Изготовить катушку индуктивности с ферритовым сердечником и измерить ее индуктивность
- Пронаблюдать петлю магнитного гистерезиса и измерить магнитные параметры материала сердечника: зависимость намагниченности и магнитной восприимчивости образца от поля, коэрцитивную силу и остаточную намагниченность.

## 3 Определение индуктивности катушки

### 3.1 Теория работы

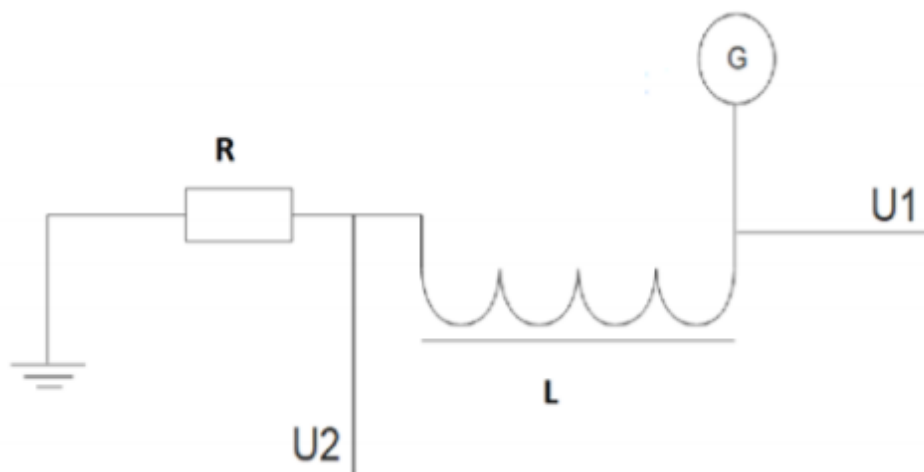


Рис. 1: Схема измерения индуктивности.  $R$  – резистор сопротивлением 95 Ом,  $L$  – катушка, индуктивность которой требуется измерить,  $G$  – выход встроенного генератора осциллографа,  $U_1$  и  $U_2$  – напряжения, измеряемое на первом и втором каналах осциллографа. Земля у генератора и обоих входов осциллографа общая.

С генератора подается синусоидальный сигнал с амплитудой 12 В. В приближении, что резистор имеет только активное сопротивление, а катушка только реактивное можно рассчитать импеданс катушки  $Z_L = i\omega L$  зная  $U_1$ ,  $U_2$  и  $R$ . Полный импеданс всей цепи равен  $Z_\Sigma = R + i\omega L$ . Тогда модули (и амплитуды) тока и напряжения в цепи связаны следующим образом:  $U_0 = I_0 \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ . Также из этого легко найти модуль тангенса разности фаз между током и напряжением:  $\tan(\phi) = \frac{\omega L}{R}$ . Измеряемое напряжение  $U_2$  равно произведению величины тока в цепи на сопротивление  $R$ , из этого получим связь между  $U_1$  и  $U_2$ :  $\frac{U_1}{U_2} = \sqrt{1 + (\frac{\omega L}{R})^2}$ , из которой можно найти индуктивность  $L$ . Из этого соотношения легко понять требования на величину сопротивления  $R$  и частоту  $\omega$ : они должны быть такими, чтобы величина  $\frac{\omega L}{R}$  заметно превышала единицу, иначе измерения будут неточными.

## 3.2 Ход работы

В первую очередь требовалось сделать катушку — намотать медную проволоку на ферритовый сердечник. Мы взяли уже намотанную катушку, измерили ее геометрические размеры. Катушка была намотана из толстой медной проволоки и состояла из 42 витков. Далее была собрана схема (1). С помощью осциллографа были измерены напряжения на катушке для токов на различных частотах, затем определены различные значения выражения  $\frac{R}{2\pi} \sqrt{(\frac{U_1}{U_2})^2 - 1}$  при различных значениях частоты.

### 3.3 Обработка данных

По полученным точкам были построены прямые по МНК и взвешенному МНК, коэффициентом которых является искомая индуктивность катушки.

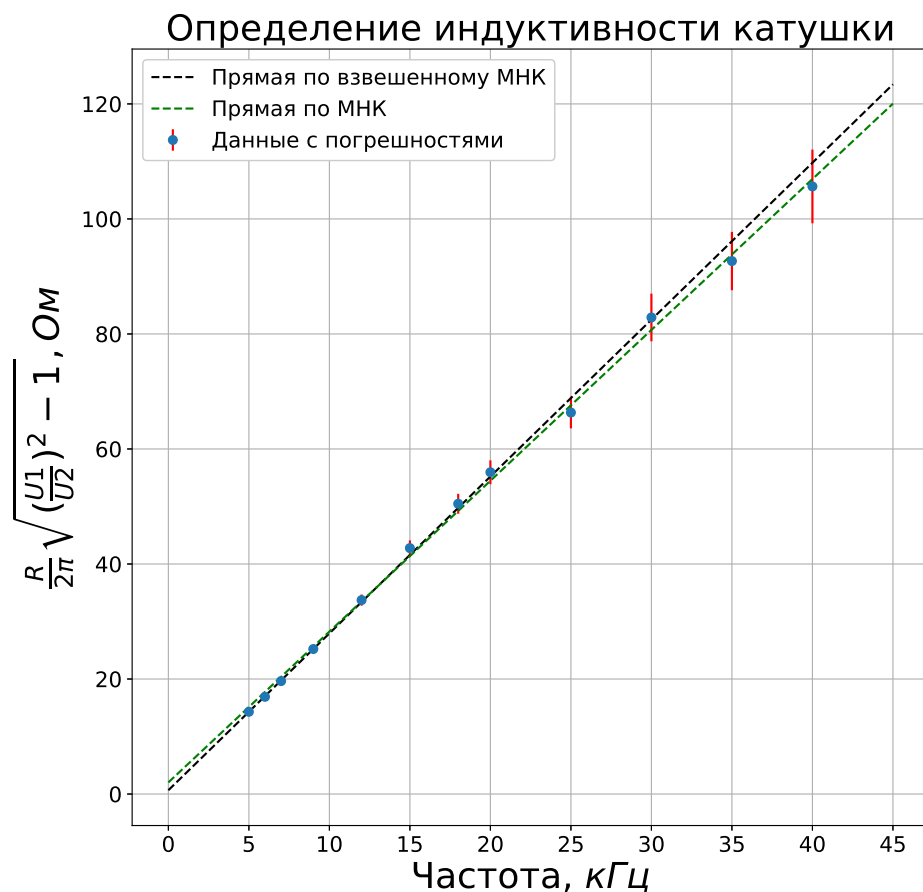


Рис. 2: На графике изображены две прямые: прямая, построенная по экспериментальным данным с помощью МНК и прямая, построенная с помощью взвешенного МНК

За основу был взят график, построенный по взвешенному МНК, так как при предыдущих измерениях индуктивности катушки получившийся результат лучше соотносился с заявленной индуктивностью и показателями точных приборов. Получившаяся индуктивность с учетом погрешностей:

$$L = 2.73 \pm 0.10 \text{ мГн}$$

## 4 Гистерезис

### 4.1 Теория работы

Для получения картины магнитного гистерезиса необходимо собрать одну из следующих схем:

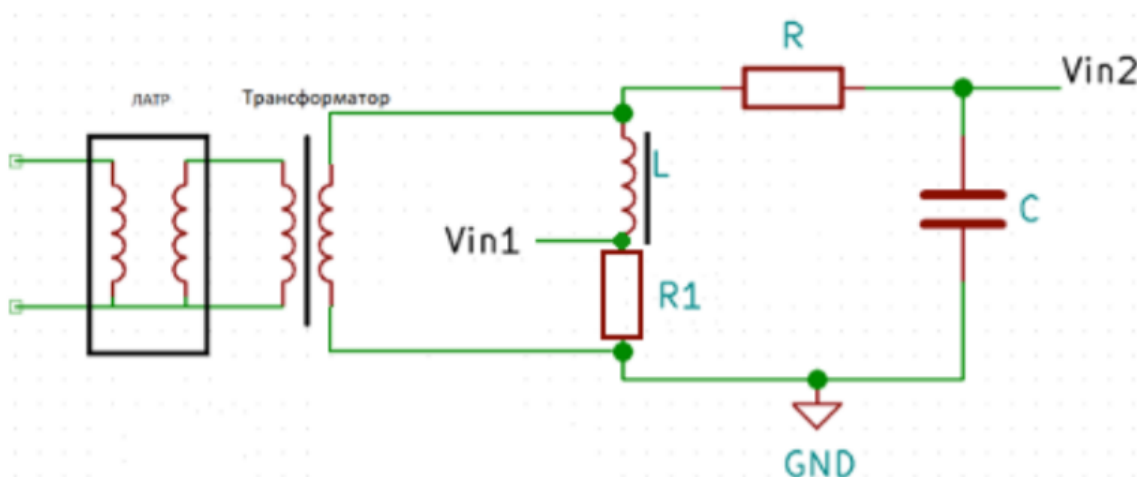


Рис. 3: Схема измерительной цепи с одной катушкой

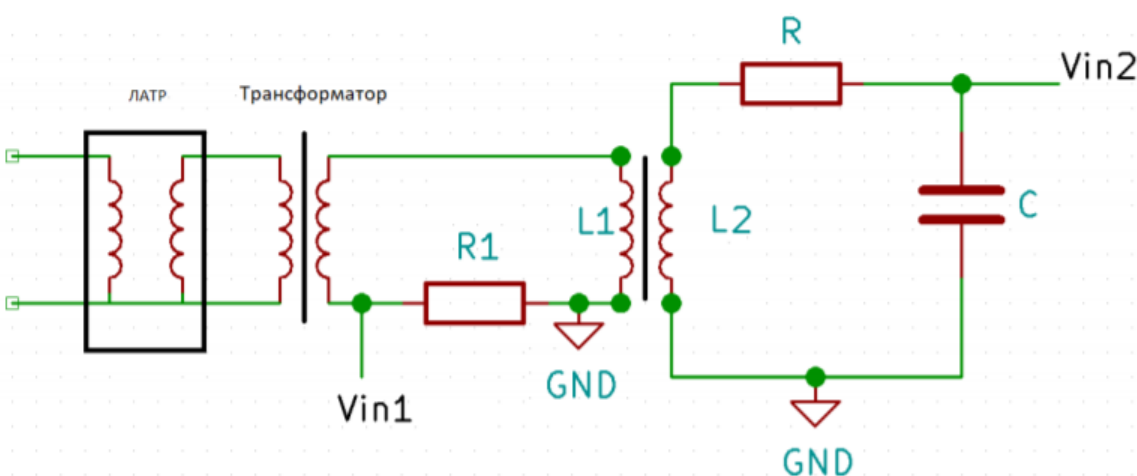


Рис. 4: Схема измерительной цепи с двумя катушками

Принципиально схемы отличаются мало. В обеих ЛАТР (лабораторный автотрансформатор) используется для питания схемы от сети и регулировки силы тока. Понижающий трансформатор нужен для повышения выходного тока и гальванической развязки схемы от сети. Резистор  $R_1$  малого сопротивления ( $0.1 - 1$  Ом) необходим для измерения силы тока, текущего через катушку,  $L(L1)$  – собственно катушка из медной проволоки, намотанная на образец. Сопротивление  $R$  (номиналом  $240 - 800$  кОм) и конденсатор (емкостью в несколько микрофарад) образуют интегрирующую цепочку. Напряжение  $V_{in1}$ , пропорциональное току через катушку и, соответственно, напряженности поля  $H$  в ней, и напряжение  $V_{in2}$ , пропорциональное интегралу напряжения на катушке и, следовательно, потоку и индукции поля  $B$  через нее, подаются на два канала осциллографа. Далее, настроив коэффициенты усиления каналов осциллографа и напряжение на входе ЛАТРа можно получить на экране осциллографа изображение петли гистерезиса. Это изображение можно записать (например, на `flesh` накопитель) и перерисовать в координатах  $B(H)$ , получив в результате картину магнитного гистерезиса в образце. Связь напряженности поля  $H$  и тока в цепи  $I$  находится по теореме о циркуляции:  $\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I$ , откуда  $H = \frac{N_1 I}{\pi D}$ , где  $N_1$  – число витков в первой катушке,  $D$  – средний диаметр тороидального сердечника. Связан с напряжением  $V_{in1}$  по закону Ома:  $V_{in1} = R_1 I$ . Напряжение на катушке (первой или второй) по закону Фарадея пропорционально производной индукции поля  $B$  в сердечнике:  $V = -\frac{d\Phi}{dt} = -S N_i \frac{dB}{dt}$ . Здесь  $S$  – площадь поперечного сечения тороидального сердечника,  $N_i$  – число витков в катушке. Для того чтобы измерять сигнал пропорциональный индукции поля используется интегрирующая цепочка из сопротивления  $R$  емкости  $C$ . Можно показать, что если постоянная времени цепочки  $RC$  значительно превышает период изменения сигнала (в данном случае это период колебания напряжения в сети электроснабжения равный  $17$  мс), то напряжение на конденсаторе  $V_{in2}$  равно  $\frac{1}{RC} \int V dt = \frac{1}{RC} S N_i B$ . Тогда напряжение  $V_{in2}$  пропорционально индукции поля в образце.

## 4.2 Ход работы

В ходе работы были собраны обе схемы. Для второй схемы потребовалось намотать на исходную катушку вторую катушку из  $56$  витков. Провода для нее использовались тонкие, так как по данной катушке текли небольшие токи. Данные снимались с помощью цифрового осциллографа для дальнейшего анализа.

## 4.3 Анализ данных

### 4.3.1 Первая схема

Для первой схемы был получен один график петли гистерезиса, так как уже на малых напряжениях картина получалась искаженной.

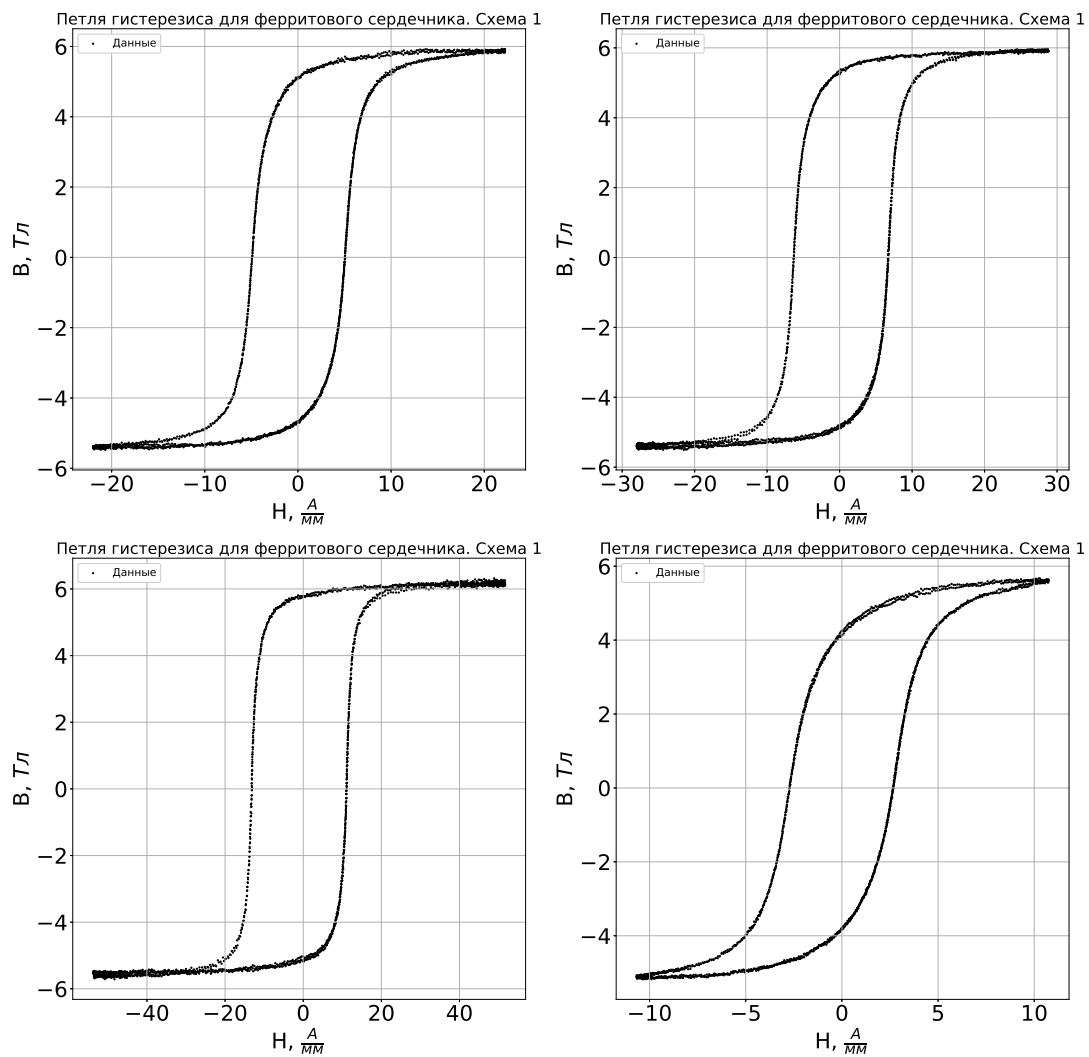


Рис. 5: 4 проводная схема измерения малого сопротивления

### 4.3.2 Ход работы

В ходе работы с помощью мультиметра и блока питания с амперметром были измерены показания напряжения на образце в зависимости от заданной силы тока на блоке питания.

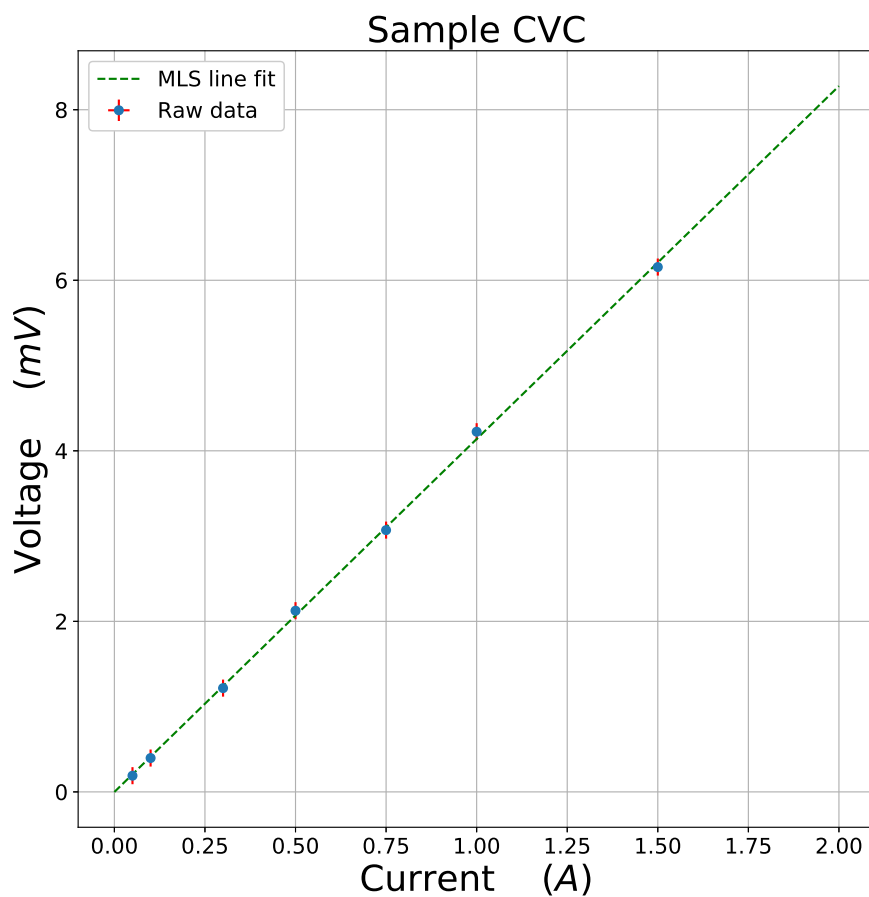


Рис. 6: Зависимость напряжения от тока на образце



С помощью была МНК построена прямая, коэффициент которой определяет искомое значение сопротивления образца  $R = 4.1 \pm 0.1 \text{ КОм}$

## 5 Генератор Ван Дер Граафа

### 5.1 Оборудование

- Генератор Ван де Граафа
- Источник постоянного тока для питания электродвигателя
- Осциллограф
- Щуп для осциллографа – 1 шт.
- Мультиметр
- Высоковольтный кабель для подключения к сфере генератора
- Провода для заземления

### 5.2 Задачи

- Определить напряжение пробоя воздуха
- Определить напряжение генератора Ван Дер Граафа по длине газового разряда в воздухе

### 5.3 Измерение тока генератора

#### 5.3.1 Теория работы

Измерить ток генератора  $I$ . Для этого подключить к генератору мультиметр. Напряжение на генераторе задается источником питания. Провести измерения при различных скоростях вращения ленты (задается установкой напряжения на источнике питания).

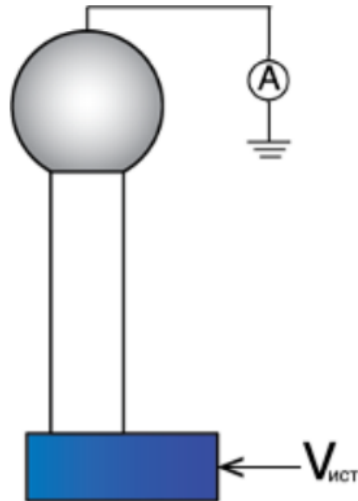


Рис. 7: Схема измерения тока генератора

### 5.3.2 Ход работы

В ходе работы к генератору был подключен мультиметр, ток был измерен при разных напряжениях, подаваемых генератором.

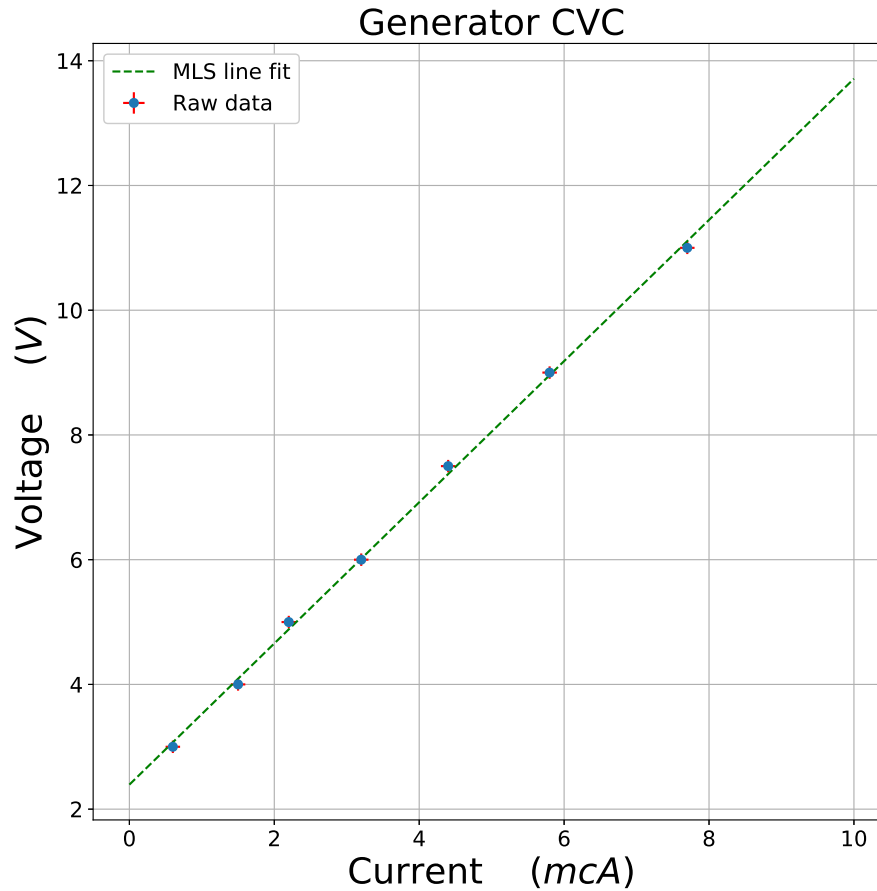


Рис. 8: Зависимость напряжения от тока на генераторе

С помощью МНК была построена прямая, определяющая коэффициент пропорциональности (сопротивление):  $U = 1.132I + 2.393$

## 5.4 Определение напряжения пробоя воздуха

### 5.4.1 Теория работы

Вернуть обратно малую заземленную сферу. Измерить период искрового разряда  $T$  при помощи осциллографа. Для измерения достаточно расположить осциллограф недалеко от генератора, период наводок на экране осциллографа совпадает с периодами искрового разряда. Следует избегать прямого подключения любых измерительных приборов к высоковольтному генератору.

Пренебрегая ёмкостью малой сферы, оценить ёмкость большой сферы генератора как  $C = 4\pi\epsilon_0 r$  где  $r$  – радиус сферы.

Измерить период искрового разряда  $T$  для различных расстояний между

сферами.

Полученные выше измерения позволяют оценить напряжение пробоя в зависимости от расстояния  $d$  между сферами:  $E_{bd} = \frac{UT}{dC}$

Оценить погрешность измерений.

#### 5.4.2 Ход работы

В ходе работы были измерены периоды искрового разряда  $T$  для разных расстояний при 2 сериях напряжений.

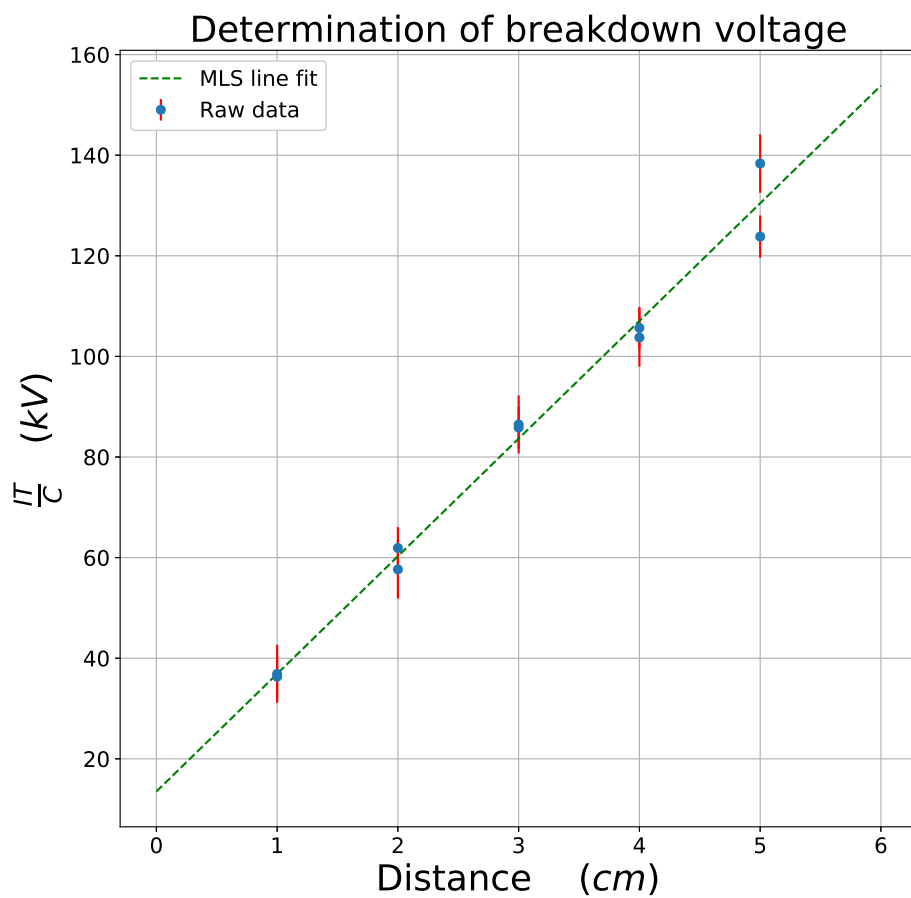


Рис. 9: Зависимость напряжения пробоя воздуха от расстояния между сферами

С помощью МНК была построена прямая, коэффициентом которой является напряженность пробоя воздуха  $E_{bd} = 23 \pm 3$  кВ/см

## 5.5 Оценка напряжений генератора

### 5.5.1 Теория работы

Один из способов измерения больших напряжений – шаровые измерительные разрядники. Порядок измерений высоковольтных напряжений регламентируются в ГОСТ 17512-82 [1]. Напряжение пробоя газов сильно зависит от давления, состава газа и формы электродов. Пренебрегая тем, что сферы имеют различный диаметр, определить напряжение генератора для различных скоростей вращения ленты. Для различных расстояний между сферами  $d$  определить напряжение по Таблице 1. Для условий отличающихся от нормальных следует использовать поправочный коэффициент  $k$ :  $U_{tr} = kU_{tab}$ , где  $U_{tab}$  – значение разрядного напряжения определенное из Таблицы 1,  $U_{tr}$  – истинное значение напряжения. Для значений относительной плотности воздуха от 0.95 до 1.05 поправочный коэффициент  $k$  можно оценить как:  $k = 0.386 \frac{P}{273+t}$  где давление  $P$  выражено в миллиметрах ртутного столба, а температура  $t$  в градусах Цельсия.

Сравнить полученные результаты с результатами из первой части работы.

### 5.5.2 Ход работы

В ходе работы на графике из предыдущей части была построена зависимость напряжения от расстояния предлагаемая Таблицей 1

На график добавилась прямая черного цвета, она соответствует зависимости, построенной по данным из Таблицы 1. Ее коэффициент наклона равен напряженности пробоя воздуха  $E_{bd} = 26$  Кв/м. Как можно заметить, коэффициенты прямых отличаются, но в пределах погрешности экспериментальных данных.

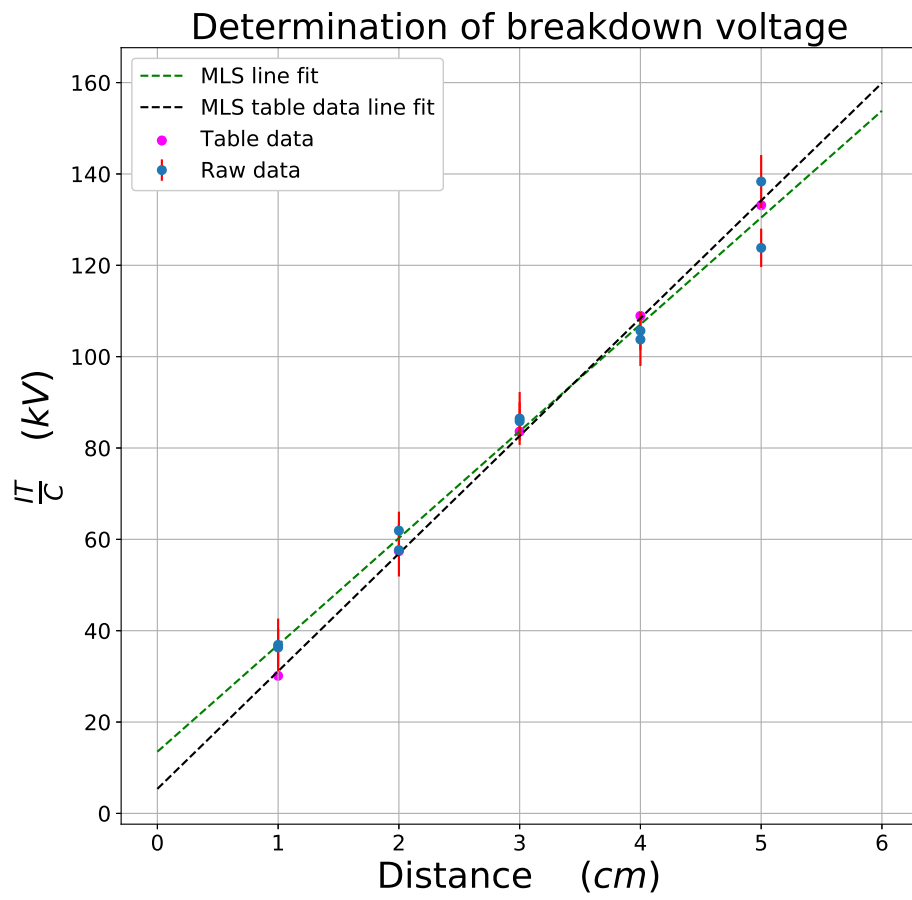


Рис. 10: Зависимость напряжения пробоя воздуха от расстояния между сферами