

# Дискретность энергетических уровней - опыт Франка Герца

Шмаков Владимир, ФФКЭ - Б04-105

## Цель работы

- Экспериментально подтвердить существование дискретных уровней энергии
- Измерить энергию перехода атома гелия в возбуждённое состояние

## Теоретические сведения

В работе изучается энергетический спектр атома гелия, энергии уровней которого изображены на рисунке 1. Согласно [источнику](#), наиболее вероятным — резонансным — переходом является переход в состояние  $1s2p$ . Энергия, необходимая для совершения данного перехода составляет  $E_g = 21.2\text{эВ}$ .

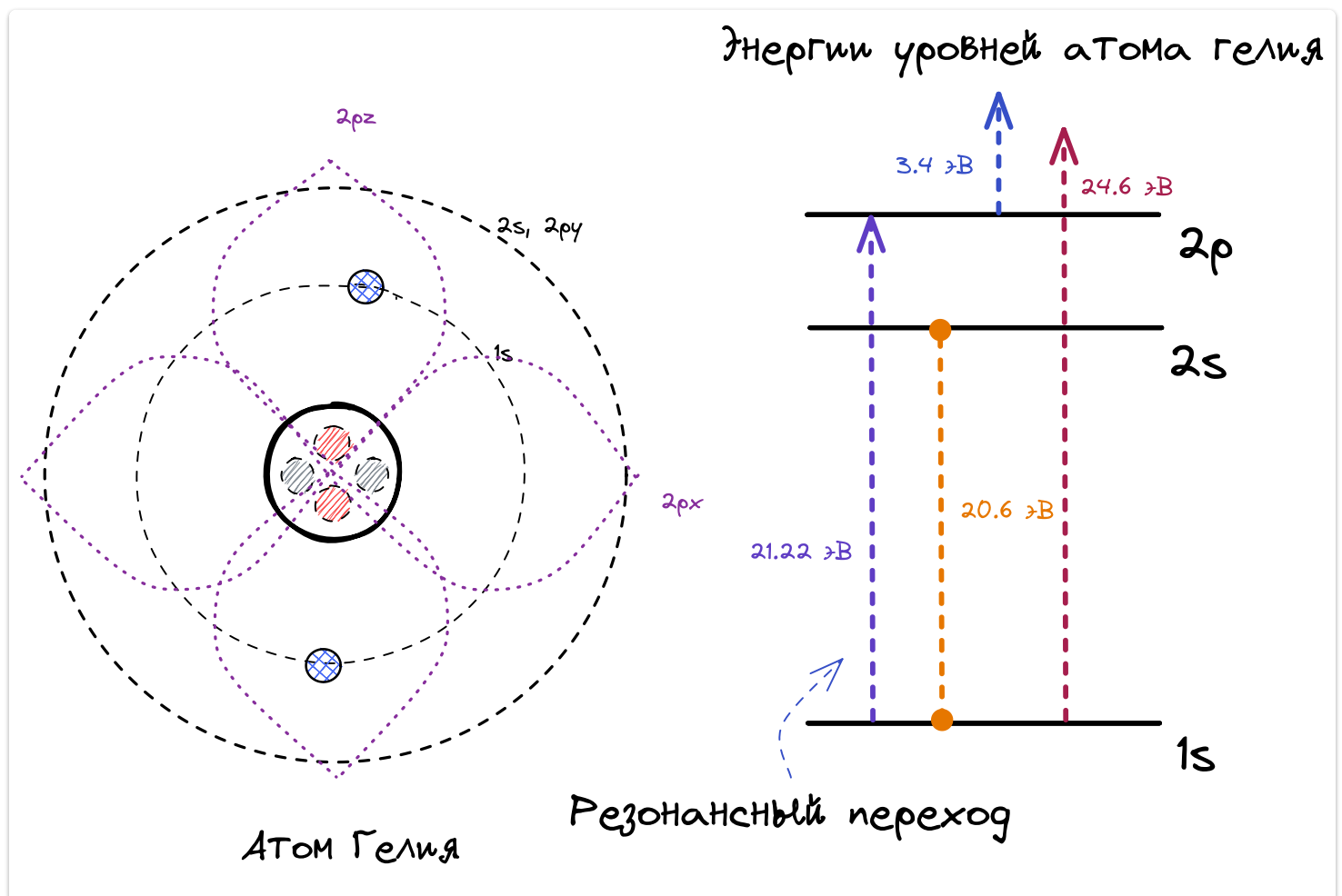


Рисунок 1. Энергетические уровни атома гелия

На рисунке 1 отмечена лишь малая часть возможных переходов. Энергетический спектр атома гелия хорошо изучен и используется во множестве физических приложений. Наиболее известным устройством в основе которого лежит гелий, является гелий-неоновый лазер.

# Методика

## Оборудование

- Триод ЛМ2, наполненный разреженным гелием
- Осциллограф
- Два блока питания
- Вольтметр
- Микроамперметр

## Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки изображена на рисунке ниже:

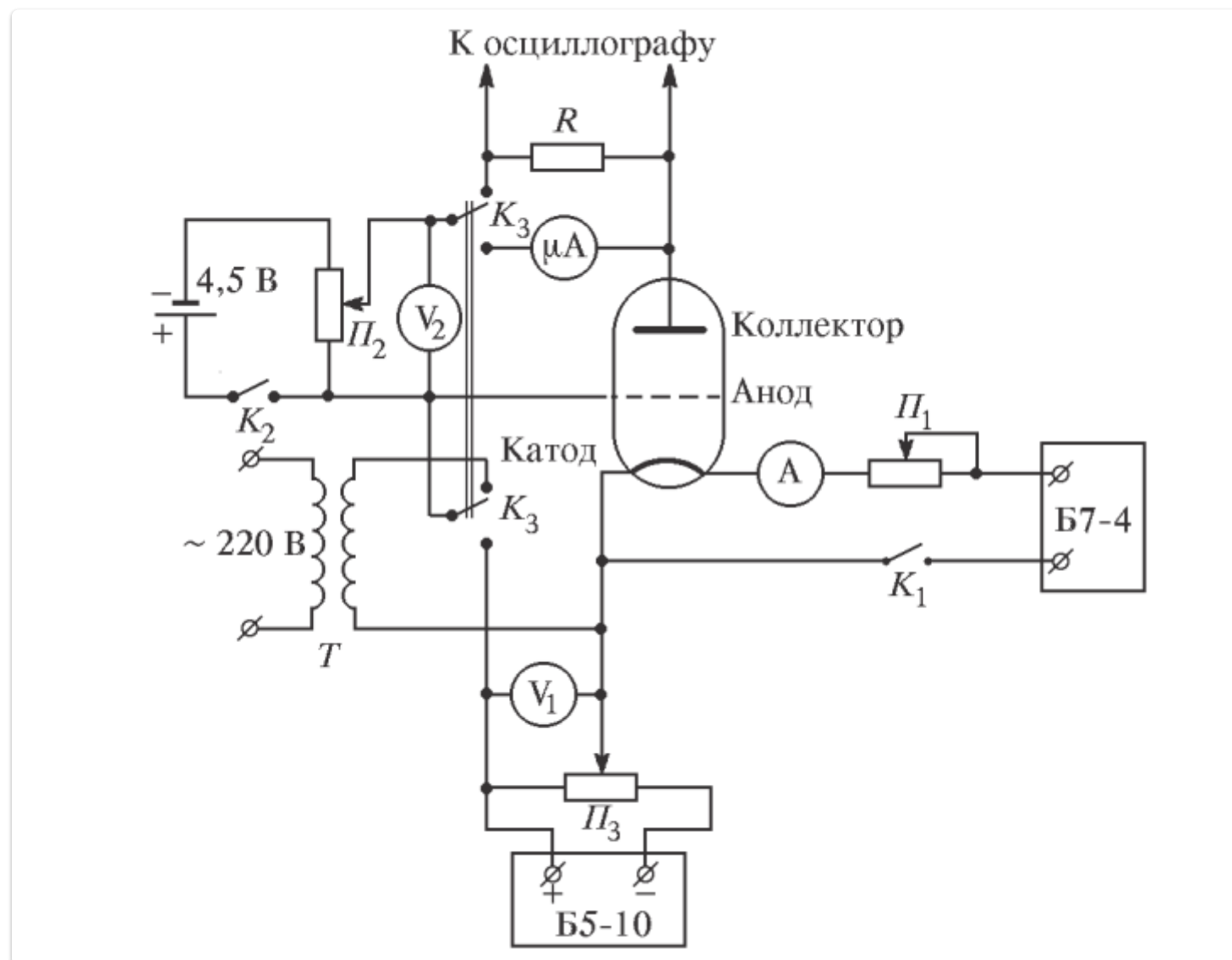
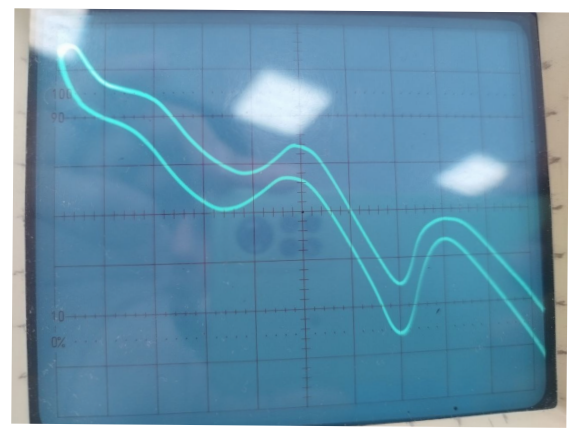
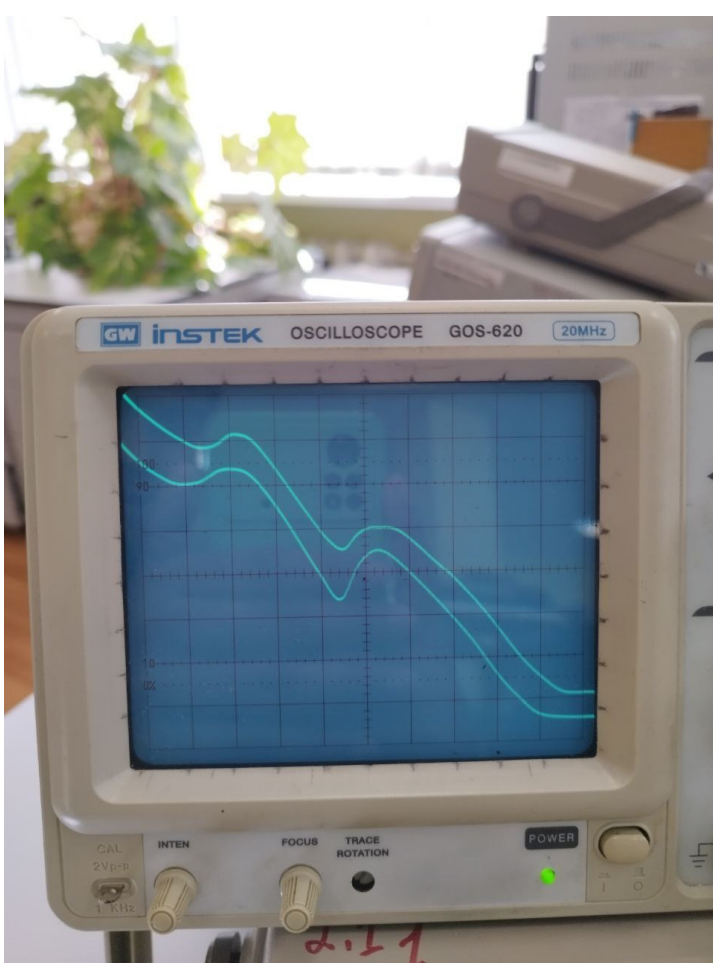


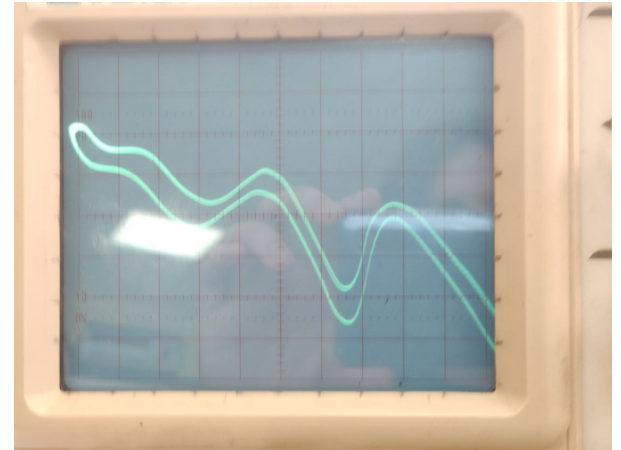
Рисунок 2. Схема экспериментальной установки

Установка способна работать в двух режимах - динамическом и статическом.

В динамическом режиме ускоряющее напряжение подаётся с понижающего трансформатора  $T$ . Также переменное напряжение трансформатора подаётся на вход  $X$  осциллографа (служит в качестве сигнала синхронизации). На вход  $Y$  подаётся напряжение падающее на нагрузочном резисторе  $R$ . Таким образом, на экране осциллографа получаем зависимость тока коллектора от величины ускоряющего напряжения:



6 В



8 В

Задерживающее напряжение 4В

Рисунок 3. Осциллограммы полученные при различных задерживающих напряжениях.

Потенциометр  $П2$  позволяет изменять величину задерживающего напряжения (напряжения между анодом и коллектором). Осциллограммы полученные при различных значениях задерживающего напряжения изображены на рисунке 3. Вид зависимости и представляет для нас наибольший экспериментальный интерес.

При увеличении ускоряющего напряжения электроны приобретают большую энергию → всё больше электронов могут преодолеть задерживающее напряжение. Таким образом ток коллектора линейно зависит от ускоряющего напряжения. Однако зависимость ломается при некотором значении задерживающего напряжения. Дело в том, что теперь электроны обладают достаточной для возбуждения атомов гелия энергией → сталкиваясь с атомами, они отдают им большую часть своей энергии и теряют способность преодолевать задерживающее напряжение. При дальнейшем увеличении ускоряющего напряжения опять устанавливается линейная зависимость — электроны, испытавшие неупругие соударения, при дальнейшем движении к аноду успевают набрать энергию, достаточную для преодоления задерживающего потенциала.

Линейная зависимость продолжается до тех пор, пока энергии электрона не начинает хватать на перевод в возбуждённое состояние сразу двух атомов. Таким образом — расстояние между двумя соседними изломами (максимумами) соответствует энергии перехода атома гелия в первое возбуждённое состояние.

При тщательной постановке опыта можно увидеть и тонкую структуру кривой спада тока, содержащую ряд минимумов, соответствующих возбуждению других уровней и ионизации атома гелия.

Чтобы точнее определить зависимость, изображенные на рисунке 3, проведём измерения в статическом режиме. Выставляя некоторые значения задерживающего напряжения будем регистрировать ток коллектора.

## Обработка результатов эксперимента

Данные полученные в ходе эксперимента могут быть найдены в репозитории:

[ShmakovVladimir/Labs](#). Нанесём на график экспериментальные точки и интерполируем зависимость:

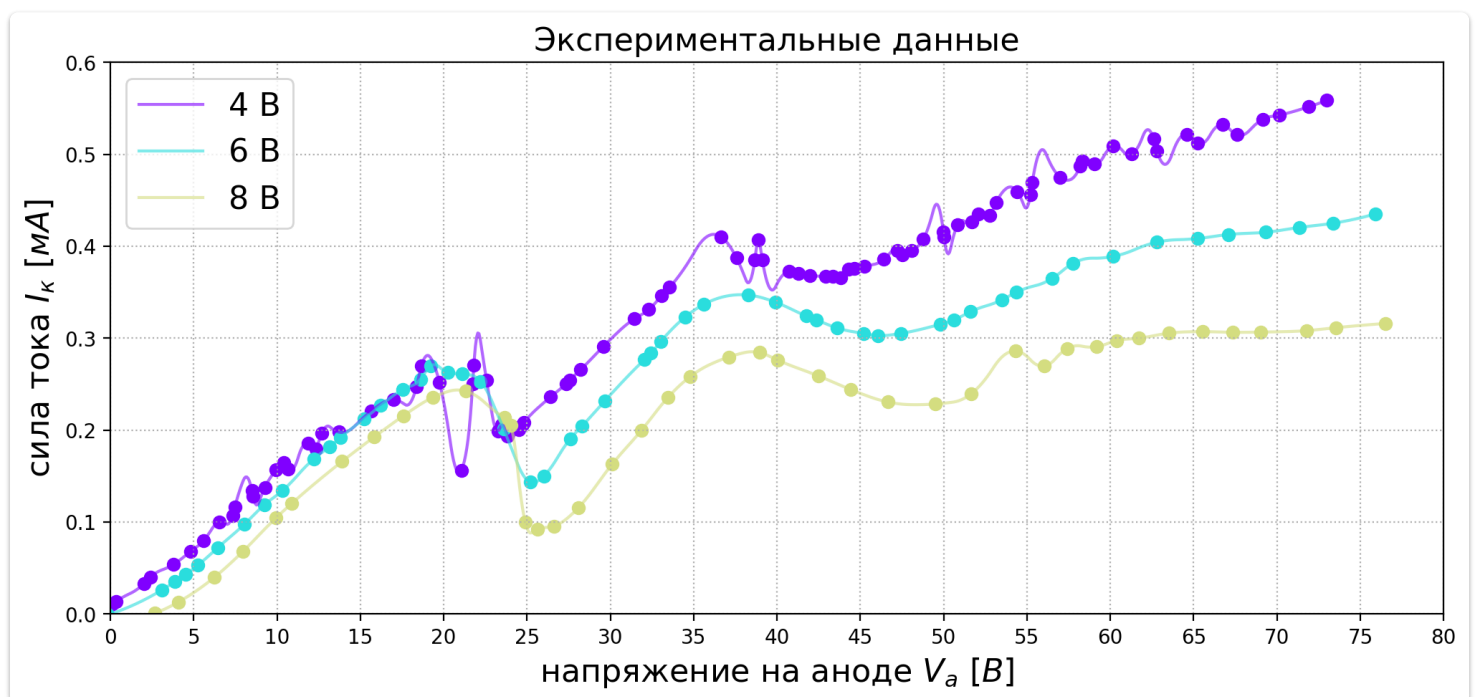


Рисунок 3. Данные полученные в ходе эксперимента

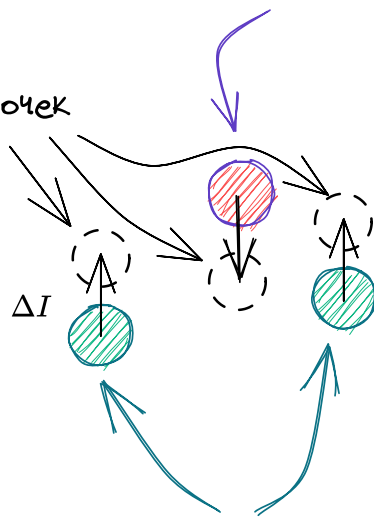
По изображенной выше картине тяжело понять какие точки считать максимумами. Попробуем придумать точную методологию определения максимумов и нахождения расстояний между ними.

### Способ 1 - нахождение нулей производной

Численно оценив производные изображенных выше функций, найдём точки экстремума. Измерение силы тока производится с некоторой экспериментальной погрешностью. Поэтому не все точки экстремума, удовлетворяющие достаточному условию локального максимума, в действительности являются максимумами. В модели эксперимента утверждать что точка является максимумом можно только при выполнении двух условий:  $I_{max} - I_{max+} > 2\Delta I \wedge I_{max} - I_{max-} > 2\Delta I$  (здесь  $I_{max}$  - предполагаемый максимум,  $I_{max+}$ ,  $I_{max-}$  - экспериментальные точки слева и справа от максимума).

$I_{\max}$  - предполагаемый максимум

Возможный сдвиг точек



$I_{\max+}$ ,  $I_{\max-}$  - ближайшие к предполагаемому максимуму экспериментальные точки

Рисунок 4. Условие максимума

Пользуясь описанным выше условием, нанесём точки локальных максимумов на экспериментальные кривые:

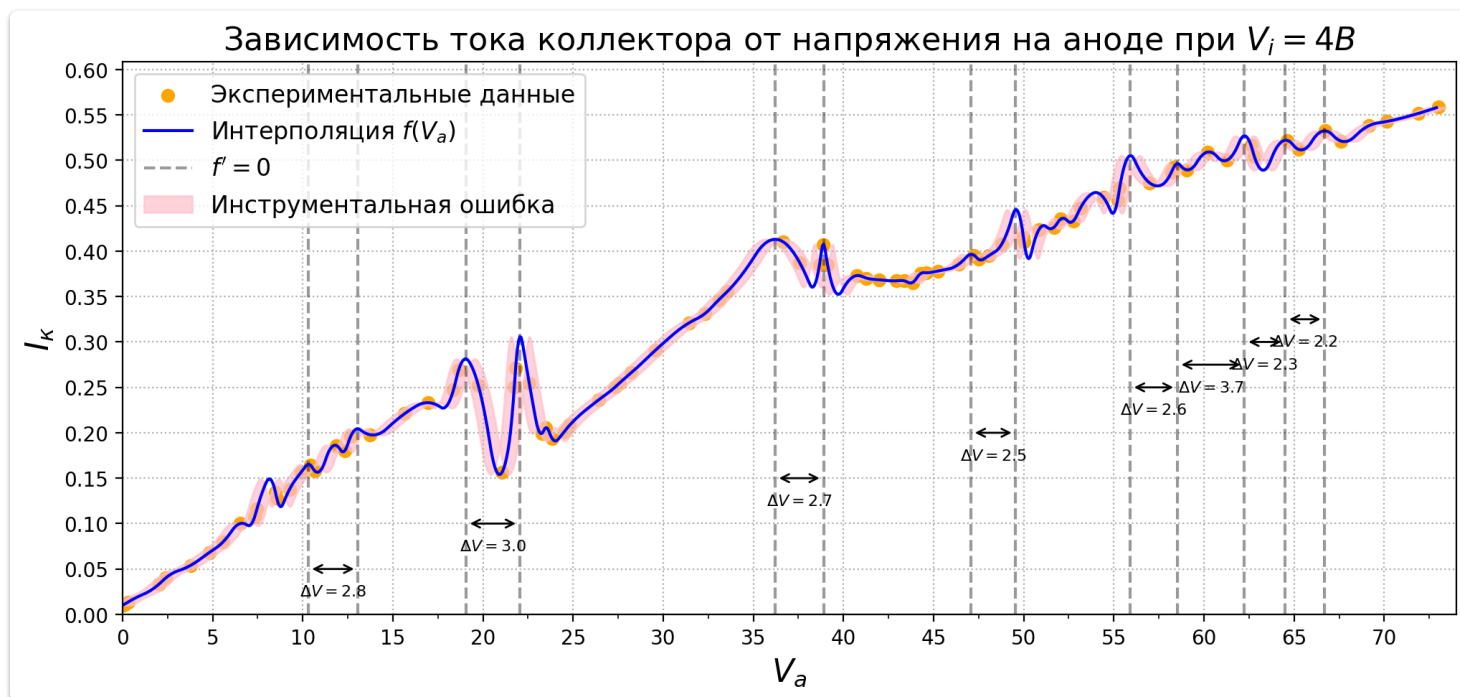


Рисунок 5.

На экспериментальных кривых полученных при задерживающих напряжениях  $V_i = 6B$  и  $V_i = 8B$  отчетливо видны изломы, соответствующие переходам из основного состояния в возбужденное.

За погрешность определения расстояния между максимумами возьмём величину равную  $2\delta V$  (за  $\delta V$  обозначена инструментальная погрешность вольтметра). Так в результате двух измерений получили энергии перехода  $E_{66} = 18.4 \pm 1$  эВ,  $E_{68_1} = 17.7 \pm 1$  эВ,  $E_{68_2} = 15.8 + 3.8 \pm 1 = 19.6 \pm 1$  эВ  $\rightarrow$

$$E_g = 18.6 \pm 1.7 \text{ эВ}$$

Зависимость тока коллектора от напряжения на аноде при  $V_i = 6B$

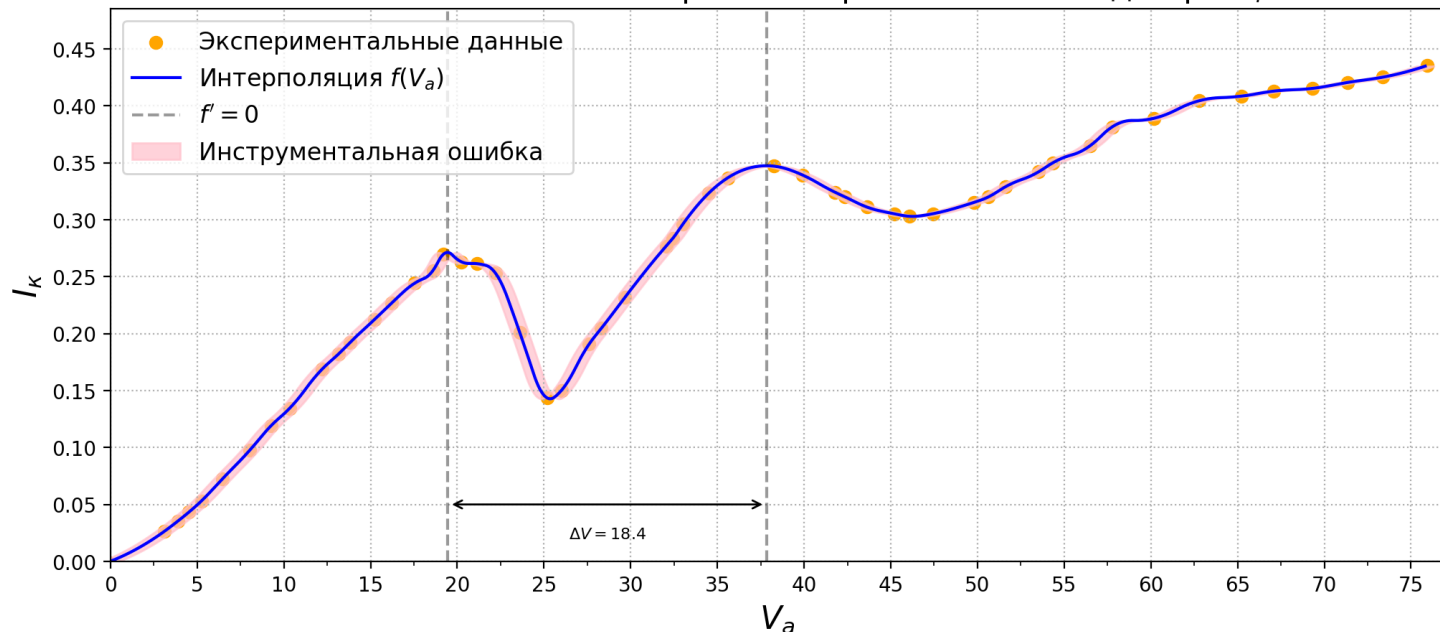


Рисунок 6.

Зависимость тока коллектора от напряжения на аноде при  $V_i = 8B$

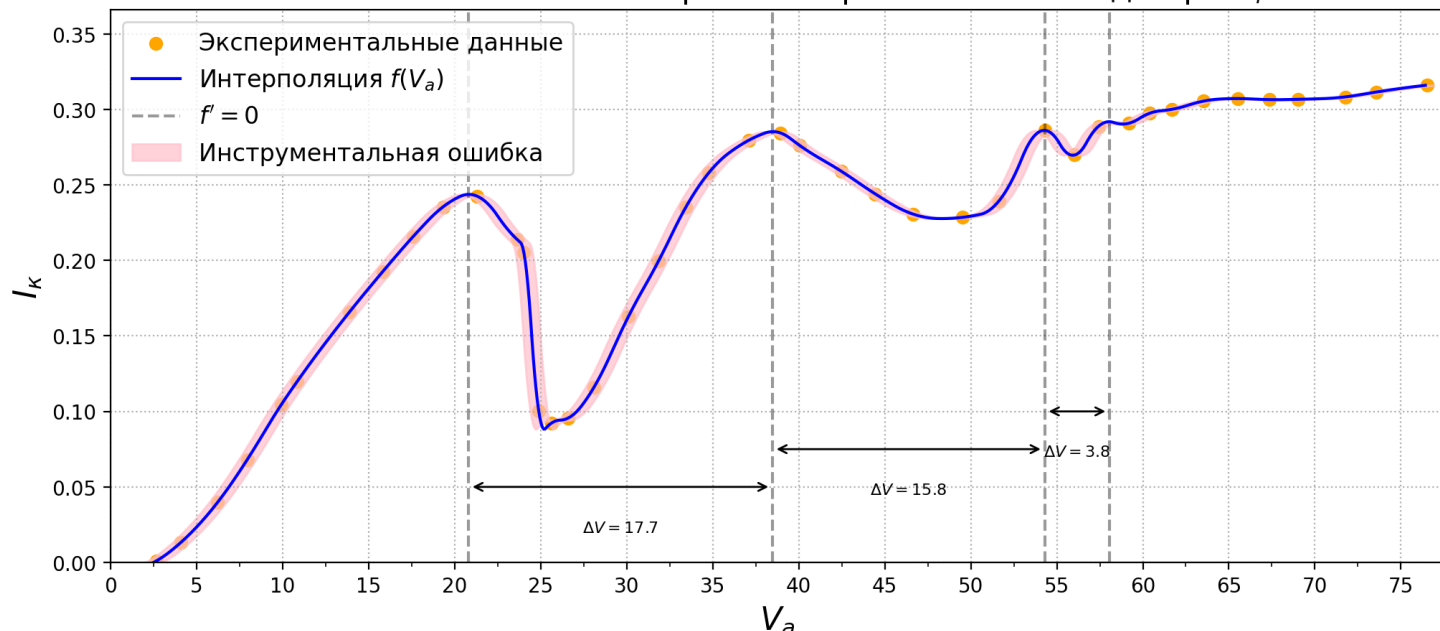


Рисунок 7.

По результатам первого эксперимента тяжело сказать какие изломы соответствуют переходам из основного состояния в первое возбуждённое. Данные сильно зашумлены и сняты с достаточно большой частотой (в таблице 100 измерений).

Однако большое количество экспериментальных точек позволяет оценить энергию перехода из возбуждённого состояния в состояние ионизации. Среднее значение энергии такого перехода составило  $2.8 \text{ эВ}$ , а среднеквадратичное отклонение оказалось равным  $0.5 \text{ эВ}$ . Таким образом:

$$E_u = 2.8 \pm 1.5 \text{ эВ}$$

## Способ 2 - гармонический анализ экспериментальных кривых

Произведём предобработку экспериментальных кривых:



### 1. Удалим линейный тренд

- Методом наименьших квадратов найдём коэффициенты наилучшей прямой.
- Поделим значения экспериментального сигнала на соответствующие значения наилучшей прямой.

### 2. Удалим гармоники связанные с затуханием амплитуды:

- Воспользовавшись преобразованием Гильберта найдём амплитудную огибающую сигнала.
- Разделим значения сигнала на соответствующие значения огибающей.

### 3. Удалим гармонику на нулевой частоте

- Чтобы сигнал колебался около нуля(без сдвига) вычтем из каждой точки среднее значение сигнала(зарегистрированное за всё время измерения).

Стадии алгоритма предобработки данных показаны на рисунке 8:

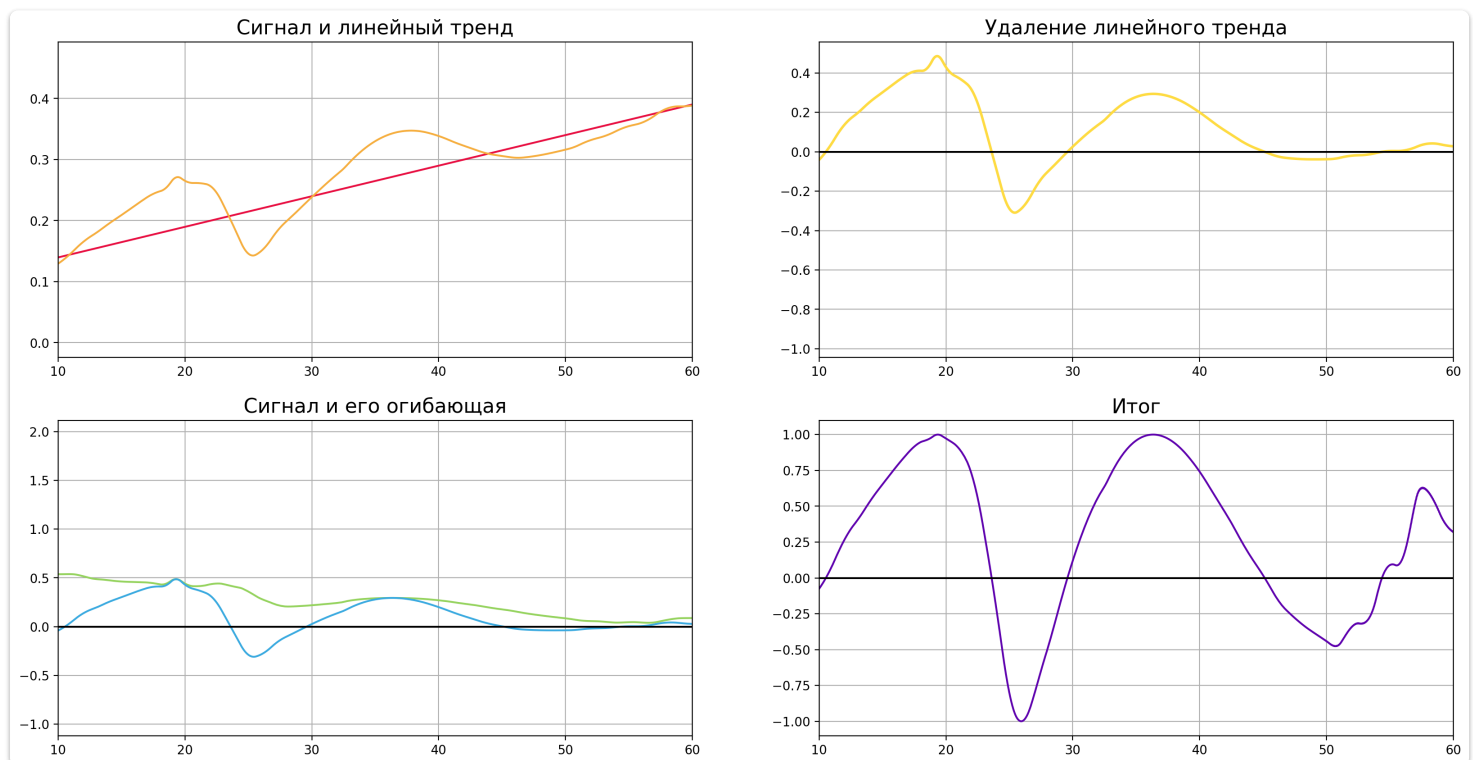


Рисунок 8. Стадии предварительной обработки сигнала.

Заметим, что за время эксперимента зарегистрировано малое число периодов экспериментального сигнала(не более трёх периодов). Ясно, что столь малое количество периодов негативно влияет на точность определения фундаментальной гармоники. Продемонстрирую это проведя небольшой эксперимент.

При помощи алгоритма `fft` разложу синусоиду частотой 1Гц в ряд. Подавая на вход разное количество периодов получаем кардинально отличающиеся спектры (смотрите рисунок 9).

Как видим, при малом числе периодов пик спектра(гармоника с максимальной амплитудой) совсем не совпадает с настоящей частотой. При этом в спектре сигнала появляется множество побочных гармоник, связанных с дискретностью алгоритма(частоты гармоник зависят не от формы сигнала, а от его длительности и частоты дискретизации).

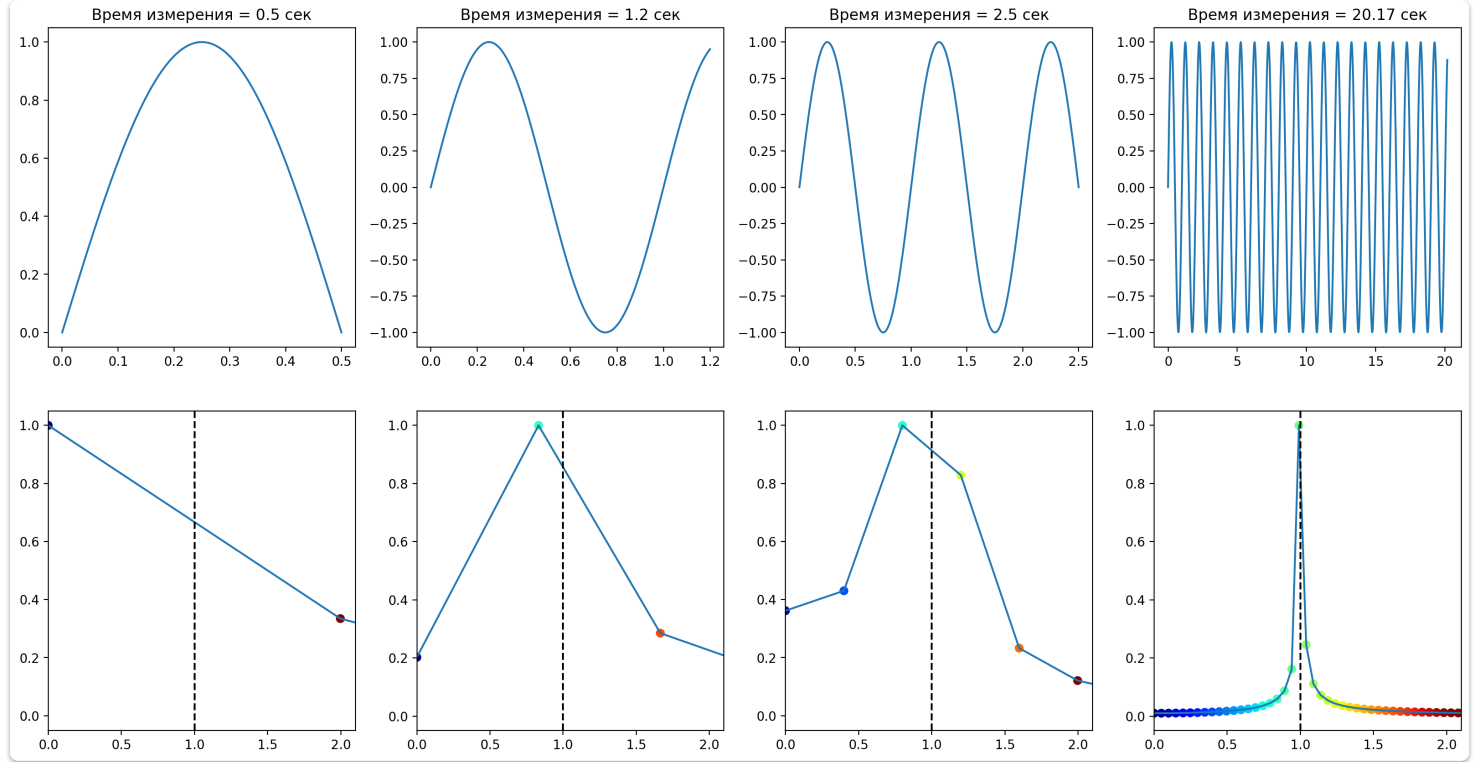


Рисунок 9. Спектры синусоиды частотой 1 Гц, полученные при различных длительностях измерений.

Поэтому для оценки частоты фундаментальной гармоники обычно берут среднее значение частот двух наибольших гармоник. За погрешность определения фундаментальной гармоники принято брать половину расстояния между данными гармониками.

Воспользуемся описанным выше методом оценки. Найдём частоту фундаментальной гармоники для трёх экспериментальных сигналов:

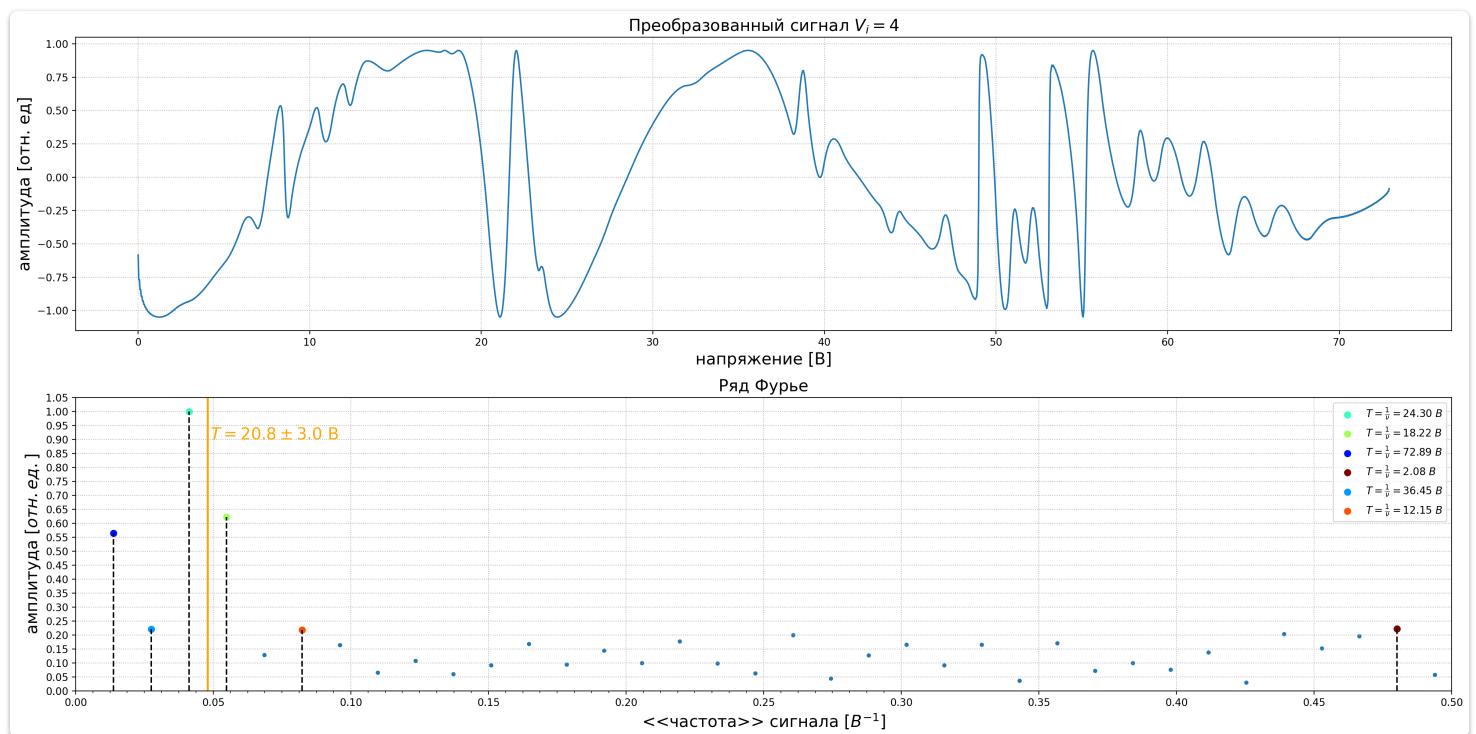


Рисунок 10.



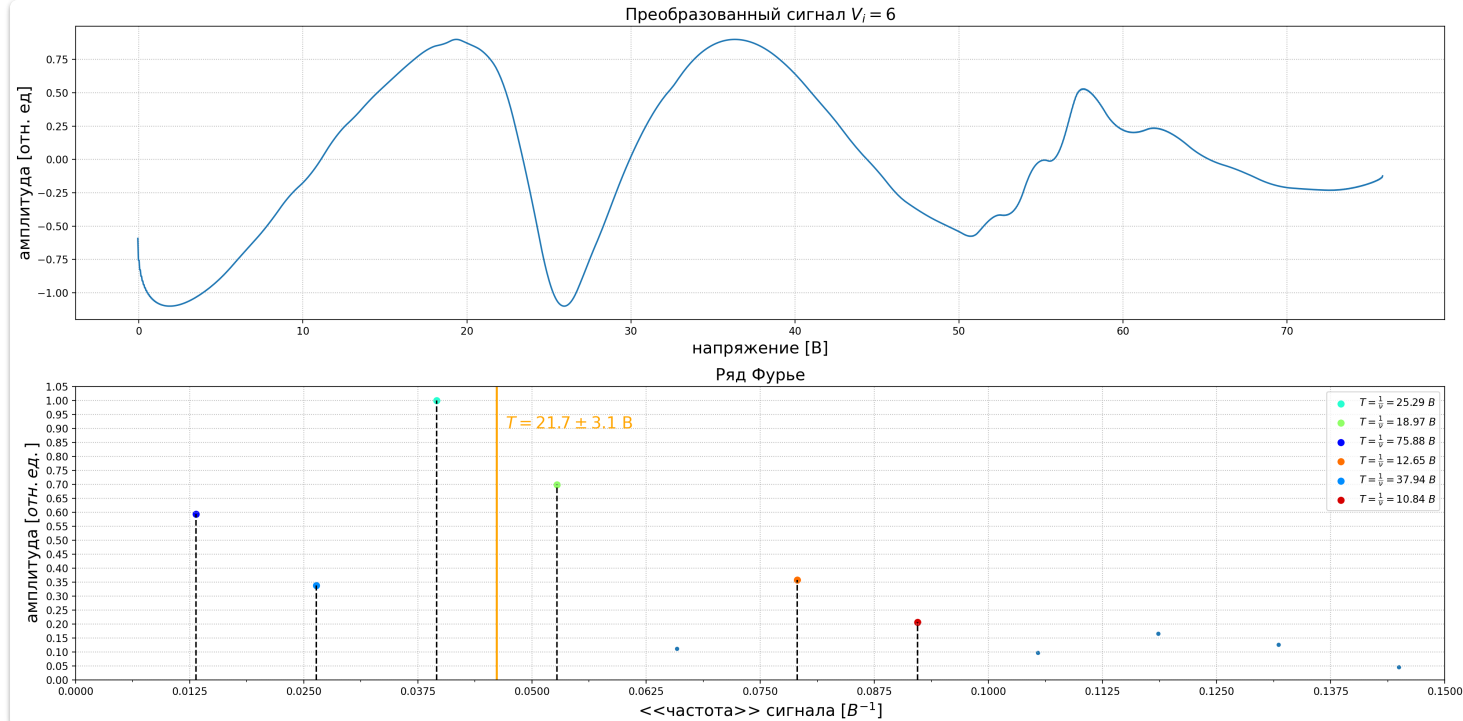


Рисунок 11.

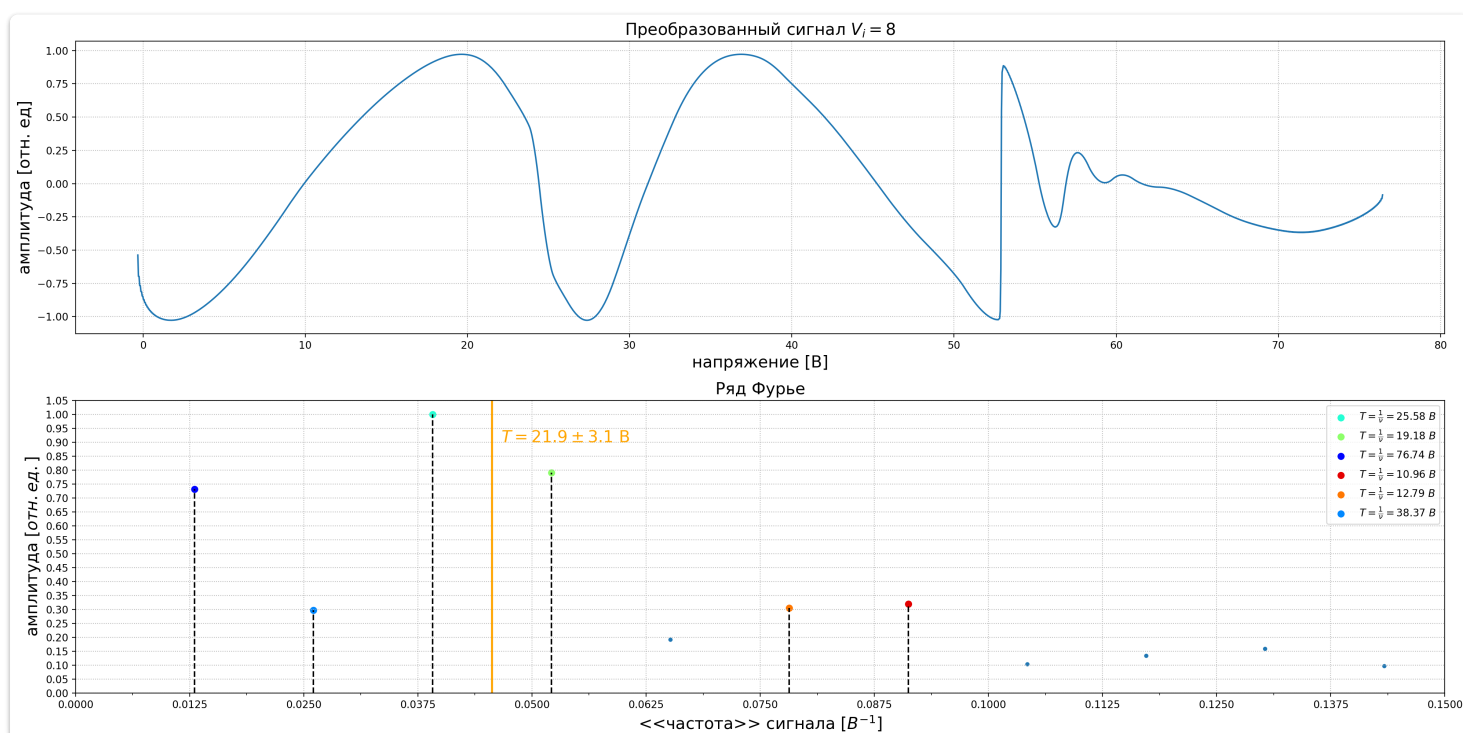


Рисунок 12.

На рисунках 10 - 12 изображены спектры сигналов, полученных при различных задерживающих напряжениях. Усреднив периоды фундаментального колебания полученное в ходе трёх экспериментов получим:

$$E_g = 21.5 \pm 4 \text{ эВ}$$

учтена погрешность вольтметра, и стандартное отклонение

## Вывод

Удалось определить энергию перехода атома гелия в возбуждённое состояние. Большое количество экспериментальных точек, полученных в эксперименте 1(см. Рисунок 5) также позволило оценить энергию ионизации возбуждённого атома.

## Обработка методом нахождения нулей производной

Усредненный результат нахождения энергии перехода в возбуждённое состояние(при обработке методом нахождения нулей производной) составил:

$$E_g = 18.6 \pm 1.7 \text{ эВ}$$

Относительная погрешность оказалась равной 10%. Однако результаты измерений не совпали с табличным значением.

Также методом нахождения нулей производной удалось оценить значение энергии ионизации возбуждённого атома. Оно оказалось равным  $2.8 \pm 1.5 \text{ эВ}$ . Погрешность измерения энергии ионизации оказалась недопустимо большой(более 50%).

Для измерения этой величины следует использовать более точное оборудование. Также может быть полезно изменить методику эксперимента. Хотелось - бы иметь возможность управлять энергией электрона до его контакта с газом.

## Гармонический анализ экспериментальных сигналов

Разложение экспериментального сигнала в ряд Фурье оказалось неплохим способом обработки полученных сигналов. Однако в силу небольшого количества экспериментальных данных не удаётся точно оценить погрешность фундаментальной гармоники.

Полученное при такой обработке значение  $E_g = 21.5 \pm 4 \text{ эВ}$  совпало с теоретическим. Но погрешность оценки очень высока - около 20%. Точность определения значения таким способом сильно зависит от диапазона значений ускоряющего напряжения.