

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

Вопрос по выбору:

Дробовой шум.

Выполнил студент:

Сериков Василий Романович

Группа: Б03-102

Москва, 2022 г.

Аннотация

Цель работы:

Измерение заряда электрона по дробовому шуму.

В работе используется:

Стенд для измерения дробового шума, состоящий из шумового диода, блока питания, широкополосного усилителя, квадратичного детектора и кварцевого генератора синусоидальных колебаний.

Теоретические сведения:

Прохождение электрического тока через вакуумную лампу обусловлено с движением электронов, испускаемых накалившимся катодом и движущихся к аноду под действием электрического поля. Прохождение электрического тока не является поэтому непрерывным процессом. Ток состоит из наложения кратковременных импульсов, возникающих при прохождении отдельных электронов. Эти импульсы случайным образом распределены во времени, вследствие чего электрический ток флуктуирует. При этом на средний (постоянный) ток накладывается флуктуационный шум, связанный с дискретностью заряда электронов — *дробовой шум*. Анализ этого шума — один из немногих способов измерения абсолютного заряда электрона. Флуктуации анодного тока — при заданной его величине — пропорциональны заряду электрона, поэтому, исследуя их, можно измерить заряд электрона.

Рассмотрим, как меняется во времени ток, проходящий во внешней цепи электронной лампы (диода) при движении через неё отдельного электрона. Пока из катода не вылетит электрон, тока в цепи лампы нет. Ток появляется, когда электрон покидает катод, и кончается, когда он приходит на анод. Распределение этого тока во времени носит сложный характер, зависящий от геометрии электродов, от распределения потенциалов в межэлектродном пространстве и от скорости электронов. В дальнейшем нас не будет интересовать форма токового импульса. Нам достаточно знать, что этот импульс является кратковременным ($\sim 10^{-8}$ с) и что за время этого импульса $\int I dt = e$, где e — заряд электрона. Будем рассматривать режим насыщения диода, когда пространственный заряд в межэлектродном пространстве отсутствует и анодный ток зависит только от количества электронов, испущенных катодом. Для обнаружения дробового шума в анодную цепь лампы включена нагрузка — параллельный колебательный контур (рис. 1).

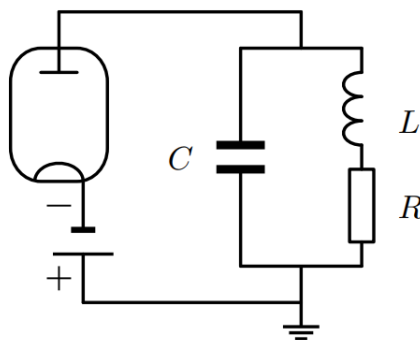


Рис. 1: Схема включения LCR-контур.

Токовый импульс, связанный с прохождением электрона через диод, приводит к зарядке конденсатора C , который входит в состав LCR-контура. В контуре возникают электрические колебания. Следующие электроны — в зависимости от фазы колебаний контура — усиливают или ослабляют колебательный процесс. Постепенно в контуре возбуждаются колебания, амплитуда и фаза которых случайным образом меняются во времени. Кроме заряда, связанного с колебательным процессом, на конденсаторе есть, конечно, заряд, возникающий из-за наличия среднего тока. Этот заряд нас интересовать не будет. Среднее значение амплитуды колебаний контура может быть найдено из энергетических соображений. Установившееся значение амплитуды определяется тем, что средняя энергия, которую приносят электроны на конденсатор, равна энергии, которая рассеивается в колебательном контуре. Пусть при электрических колебаниях в контуре мгновенное значение напряжения на конденсаторе равно

$$U = U_0 \cos(\omega t) \quad (1)$$

До пролёта очередного электрона заряд на конденсаторе равен $q_1 = CU_0 \cos(\omega t)$, а после пролёта он принимает значение q_2 :

$$q_2 = q_1 + e \quad (2)$$

Приход электрона увеличивает энергию конденсатора на ΔW :

$$\Delta W = \frac{2eCU_0 \cos(\omega t) + e^2}{2C} \quad (3)$$

Пусть в секунду через лампу проходят N электронов. Полное увеличение средней энергии конденсатора складывается из N слагаемых, определяемых формулой (3). При этом вклад от первого члена формулы обращается в нуль, так как электроны приходят на конденсатор в произвольные моменты времени, а среднее значение $\cos(\omega t)$ равно нулю. Средняя мощность, приносимая электронами на конденсатор, определяется поэтому только вторым слагаемым и равна P :

$$P = N \frac{e^2}{2C} \quad (4)$$

Рассчитаем теперь потери в сопротивлении. Проходящий через него ток IR складывается из постоянного тока I_+ и колебательного тока контура I_- . Выделяемая в сопротивлении мощность в среднем равна

$$\langle P_R \rangle = \langle I^2 R \rangle = R \langle (I_+ + I_-)^2 \rangle \quad (5)$$

Зная, что среднее значение $\langle \sin(\omega t) \rangle = 0$, а $\langle \sin^2(\omega t) \rangle = 1/2$ и $I_- = dq/dt$ найдём

$$\langle P_R \rangle = RI_+^2 + R \langle I_-^2 \rangle = RI_+^2 + \frac{1}{2} RC^2 U_0^2 \omega^2 \quad (6)$$

Приравняем мощность (4), возбуждаемую электронами в контуре, к мощности $R \langle I_-^2 \rangle$, теряемой в сопротивлении из-за наличия колебаний. Заметив, что $Ne = I_a$, а амплитудное значение напряжения на конденсаторе U_0 связано с эффективным значением $U_{\text{эфф}}$ обычным соотношением $U_{\text{эфф}} = U_0/\sqrt{2}$, найдём для заряда электрона e следующую формулу:

$$e = \frac{2\omega^2 RC^3 U_{\text{эфф}}^2}{I_a} \quad (7)$$

Можем записать выражение для e через добротность контура $Q = 1/\omega RC$

$$e = \frac{4\pi f C^2 U_{\text{эфф}}^2}{Q I_a} \quad (8)$$

Экспериментальная установка:

Блок-схема установки изображена на рис 2. В качестве шумового диода используется диод 2ДЗБ, работающий в режиме насыщения. В его анодную цепь включён параллельный колебательный контур LC. Активное сопротивление катушки L играет роль резистора R. Конденсатор C непосредственно включён в цепь контура при нижнем положении переключателя " U_k " (его кнопка не нажата). Измерение напряжения на контуре производится квадратичным детектором (отклик которого пропорционален квадрату напряжения). Перед измерениями сигнал, поступающий с контура, усиливается усилителем. Также используется генератор для калибровки квадратичного детектора и для измерения добротности контура.

Выходное напряжение генератора U_r целиком падает на активном сопротивлении контура R. Поэтому $U_r = RI$, где I — ток в контуре. Найдём теперь напряжение U_k , подаваемое на усилитель и измеряемое квадратичным детектором:

$$U_k = U_r - \frac{I}{i\omega C} \approx \frac{iU_r}{\omega RC}$$

Тогда добротность контура:

$$Q = \frac{U_k}{U_r}$$

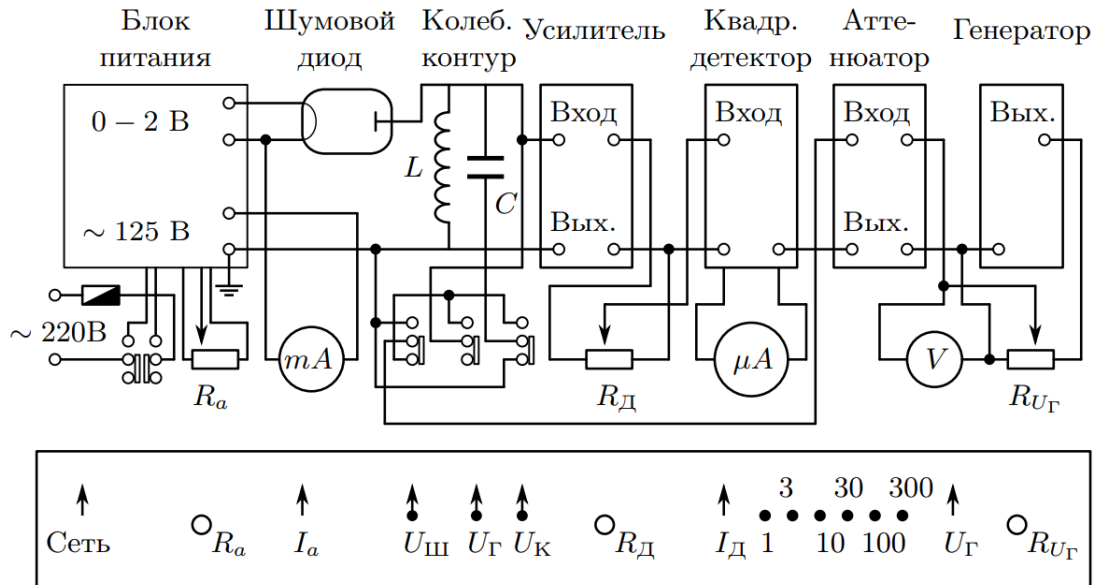


Рис. 2: Схема установки для измерения дробового шума.

Результаты измерений и обработка данных:

Проверка квадратичности детектора:

1. Включим стенд в режим измерения напряжения генератора. Установим максимальную чувствительность квадратичного детектора и выберем предел измерений для вольтметра (100 мкВ аттенюатора). Изменяя выходное напряжение генератора, измерим зависимость тока квадратичного детектора I_d от входного напряжения усилителя U_r . Полученные данные занесем в таблицу 1.

U_r , мкВ	60	62	64	66	68	70	72	74	76
I_d , мкА	38	42	44	47	50	53	56	60	63
U_r , мкВ	78	80	82	84	86	88	90	92	94
I_d , мкА	66	70	74	79	83	87	91	96	100

Таблица 1: Зависимость $I_d(U_r)$, $\sigma_{U_r} = 1$ мкВ, $\sigma_{I_d} = 1$ мкА

2. По полученным данным построим график зависимости $I_d(U_r)$

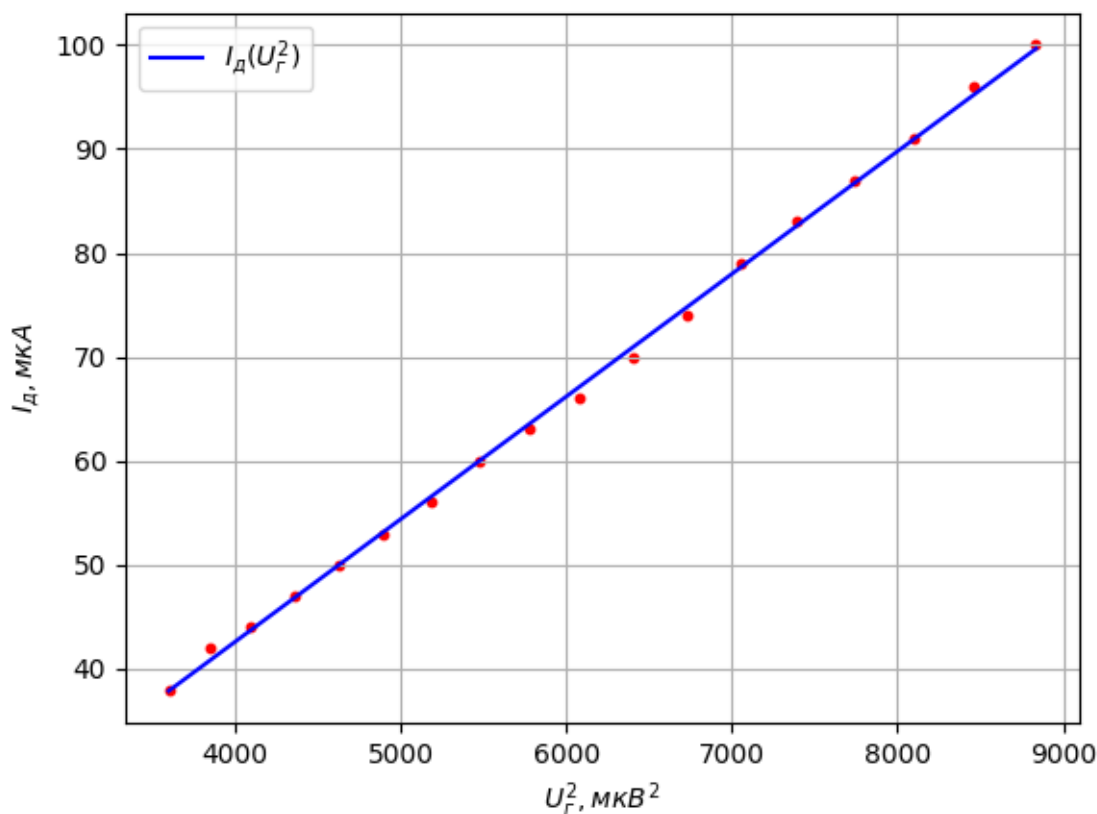


Рис. 3: График зависимости тока квадратичного детектора от квадрата входного напряжения усилителя

Измерение напряжения шума:

3. Для различных значений анодного тока I_a определим эффективное напряжение. Для этого установим произвольное значение шумового тока I_d . Для пересчёта отклика детектора на шум в единицы напряжения подключим к усилителю генератор напряжений вместо шумового диода. Установим то же значение тока I_d , которое было выбрано в режиме измерения шума, тогда значение на вольтметре будет искомым напряжением. Полученные значения занесем в таблицы 2 и 3.

	I_d , мкА	$U_1^{\text{эфф}}$, мкВ		I_d , мкА	$U_2^{\text{эфф}}$, мкВ
$I_a = 1$, мА	75	80	$I_a = 2$, мА	40	100
	70	76		50	105
	60	75		60	105
	50	74		70	105
	40	74		80	105
	I_d , мкА	$U_2^{\text{эфф}}$, мкВ		I_d , мкА	$U_2^{\text{эфф}}$, мкВ
$I_a = 3$, мА	40	120	$I_a = 4$, мА	40	130
	50	120		50	130
	60	120		60	135
	70	120		70	135
	80	125		80	140

Таблица 2: Значения для эффективного напряжения в зависимости от шумового тока. $\sigma_{I_a} = 0,1$ мА, $\sigma_{I_d} = 1$ мкА, $\sigma_{U_1^{\text{эфф}}} = 1$ мкВ, $\sigma_{U_2^{\text{эфф}}} = 5$ мкВ

Измерение добротности контура:

4. Для тех же анодных токов из предыдущего пункта установим режим измерения напряжения на контуре при его последовательном возбуждении. При нулевом напряжении на вольтметре подберем чувствительность детектора: установим стрелку микроамперметра детектора на любое целое деление. Измерим приращение тока детектора ΔI_d при изменении напряжения генератора от нуля до любого напряжения V_1 . Затем включим режим измерения напряжения на генераторе и подберем напряжение V_2 , при котором ток квадратичного детектора равен приращению ΔI_d в режиме измерения сигнала с контура. Тогда добротность контура равна $Q = \frac{U_k}{U_r}$. Таким образом мы сможем посчитать заряд электрона по формуле(8). Полученные результаты занесем в таблицы 3 и 4.

I_a , мА	I_0^d , мкА	I_1^d , мкА	U_1^r , мкВ	U_2^r , мкВ	Q
1	70	89	0,20	46	230
	50	70	0,30	56	187
	40	50	0,20	41	205
	60	90	0,34	62	182
2	40	60	0,50	75	150
	50	70	0,40	68	170
	60	80	0,36	64	178
	70	90	0,37	59	160

I_a , мА	I_0^d , мкА	I_1^d , мкА	U_1^r , мкВ	U_2^r , мкВ	Q
3	40	60	0,70	86	123
	50	70	0,57	76	133
	60	80	0,52	72	138
	70	90	0,44	65	148
4	40	60	0,88	96	109
	50	70	0,84	87	104
	60	80	0,68	76	112
	70	90	0,63	72	114

Таблица 3: Значения добротности контура, $\sigma_{I_a} = 0,1$ мА, $\sigma_{I_d} = 1$ мкА, $\sigma_{U_1^r} = 0,01$ мкВ, $\sigma_{U_2^r} = 1$ мкВ, $\varepsilon_Q = 4\%$

I_a , мА	$\langle U_{эфф} \rangle$, мкВ	$\langle Q \rangle$	e , 10^{-19} Кл	$\langle e \rangle$, 10^{-19} Кл
1	76	201	0,65	$0,78 \pm 0,09$
2	104	165	0,74	
3	121	136	0,81	
4	134	110	0,92	

Таблица 4: