

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Кафедра Формирования и обработки радиосигналов

ОТЧЁТ
по лабораторной работе №3
«LC-автогенератор»
По курсу: Формирование радиосигналов

Группа: ЭР-13-21

Бригада: 1

Выполнили: Алдошин Е.А.

Кон Р.А.

Проверил: Удалов Н.Н.

Москва

2024

Цель работы: Исследование режимов работы LC-автогенератора.

Домашняя подготовка

1. Исходные данные

Таблица 1 – Номиналы элементов трехточки

Номер положения переключателя	C_3	$C_1 = C_1^{\text{осн}} + C_1^{\text{доп}}$			$C_2 = C_2^{\text{осн}} + C_2^{\text{доп}}$		
i	пФ	$C_1^{\text{осн}}$, пФ	+	$C_1^{\text{доп}}$, пФ	$C_2^{\text{осн}}$, пФ	+	$C_2^{\text{доп}}$, пФ
1	47	240	+	150	240	+	1000
2	36			120			560
3	33			91			330
4	27			62			200
5	24			30			120
6	20			0 (не впаян)			0 (не впаян)

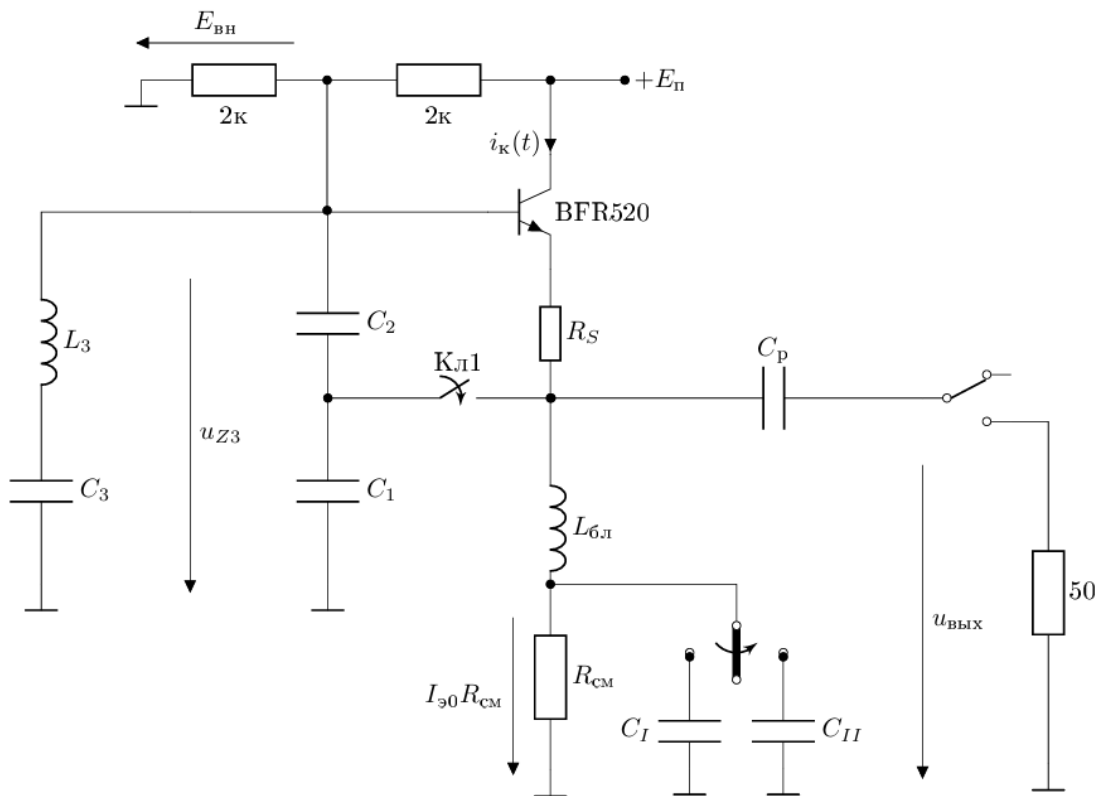


Рисунок 1 – Электрическая схема автогенератора (АГ)

Таблица 2 – Величины, характеризующие режим работы АГ

f_0 , МГц	F	θ , град	$I_{0\text{нач}}$, мА	$E_{\text{п}}$, В	S , мА/В	U_{Z1} , В	U_{Z3} , В
12,5	4	66.2	12	9	50	3.308	5.513

2. Расчетное задание

На режим работы АГ и элементы контура накладываются следующие ограничения:

- все конденсаторы без потерь;
- импеданс индуктивности L_3 содержит действительную часть 15 Ом;
- $F = 4$;
- $C_1 = \frac{2}{3} C_2$.

Из описанных выше ограничений:

$$k = \frac{X_2}{X_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{2}{3}$$
$$\gamma_1(\theta) = F^{-1} = \frac{1}{4} = 0.25$$

Угол отсечки:

$$\theta = 66.2^\circ$$
$$\gamma_0(\theta) = \gamma_0(66.2^\circ) = 0.143$$

В качестве АЭ используется биполярный транзистор BFR520 с подключенным к эмиттеру резистором $R_S = 20$ Ом. Крутизна управления током такого АЭ S мало зависит от свойств транзистора и в основном определяется номиналом сопротивления резистора:

$$S \approx \frac{1}{R_S} = \frac{1}{20} = 0.05 \text{ См} = 50 \text{ мСм}$$

Внешнее смещение $E_{\text{вн}}$ задается резистивным делителем:

$$E_{\text{вн}} = E_{\text{п}} \cdot \frac{2 \text{ кОм}}{2 \text{ кОм} + 2 \text{ кОм}} = 9 \cdot \frac{1}{2} = 4.5 \text{ В}$$

Фактор автосмещения:

$$A = SR_{\text{см}} = 0.05 \cdot 300 = 15$$

$$\frac{I_{0\text{нач}}}{SV_1} = \frac{A\gamma_0(\theta) - \cos(\theta)}{1 + A}$$

Амплитуда управляющего напряжения:

$$V_1 = \frac{I_{0\text{нач}}(1 + A)}{S[A\gamma_0(\theta) - \cos(\theta)]} = \frac{0.012 \cdot (1 + 15)}{0.05 \cdot [15 \cdot 0.143 - \cos(66.2^\circ)]} = 2.205 \text{ В}$$

Амплитуды напряжений u_{z1}, u_{z2}, u_{z3} :

$$U_{z2} = V_1 = 2.205 \text{ В}$$

$$U_{z1} = \frac{U_{z2}}{k} = \frac{3}{2} \cdot 2.205 = 3.308 \text{ В}$$

$$U_{z3} = U_{z2}(1 + k^{-1}) = 2.205 \cdot \left(1 + \frac{3}{2}\right) = 5.513 \text{ В}$$

По описанию лабораторной работы: $L_3 = 5.6 \text{ мкГн}$

$$L_{\Sigma} = L_3$$

$$C_{\Sigma} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right)^{-1}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\Sigma}C_{\Sigma}}}$$

$$C_{\Sigma} = \frac{1}{4\pi^2 f_0^2 L_3} = \frac{1}{4\pi^2 (12.5 \cdot 10^6)^2 \cdot 5.6 \cdot 10^{-6}} = 2.89 \cdot 10^{-11} \text{ Ф} \approx 29 \text{ пФ}$$

Характеристическое сопротивление:

$$\rho = 2\pi f_0 L_{\Sigma} = 2\pi \cdot 12.5 \cdot 10^6 \cdot 5.6 \cdot 10^{-6} = 440 \text{ Ом}$$

Добротность:

$$Q = \frac{\rho}{r_{\Sigma}} = \frac{440}{15} = 29.3$$

Резонансное сопротивление:

$$R_{\text{oe}} = \rho Q = 440 \cdot 29.3 = 12892 \text{ Ом}$$

Входное сопротивление колебательного контура:

$$R_{\text{к}} = \frac{V_1}{I_0} = \frac{2.205}{12 \cdot 10^{-3}} = 183.75 \text{ Ом}$$

Коэффициент включения:

$$p = \frac{C_{\Sigma}}{C_1} = \sqrt{\frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{oe}}}} = \sqrt{\frac{183.75}{12892}} = 0.119$$

$$C_1 = \frac{C_{\Sigma}}{p} = \frac{29 \text{ пФ}}{0.119} = 244 \text{ пФ}$$

$$C_2 = \frac{C_1}{k} = \frac{3}{2} \cdot 244 \text{ пФ} = 366 \text{ пФ}$$

$$C_3 = \left(\frac{1}{C_\Sigma} - \frac{1}{C_1} - \frac{1}{C_2} \right)^{-1} = 36 \text{ пФ}$$

Альтернативный метод расчета ёмкостей:

Зная, что $C_3 \ll C_1, C_2$, тогда $C_3 \approx C_\Sigma = 29 \text{ пФ}$, ближайшее значение по таблице 1 это 27 пФ при положении переключателя №4, при этом положении переключателя: $C_1 = 302 \text{ пФ}, C_2 = 440 \text{ пФ}$.

Таблица 3 – Ёмкости конденсаторов контура АГ

Номер положения переключателя	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C_3 , пФ
Расчёт	244	366	36
Номиналы из таблицы 1	240	360	36
Положения переключателей	6	5	2

3. Осциллограммы переходных процессов $u_{Z3}(t)$

При выключении АГ:

$$u_{Z3}(t) = U_{Z3} e^{-\alpha_{\text{кк}} t} \cos(\omega_{\text{кк}} t)$$

$$\alpha_{\text{кк}} = \frac{r}{2L_3} = \frac{15}{2 \cdot 5.6 \cdot 10^{-6}} = 1.34 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{с}}$$

$$\omega_{\text{кк}} = \sqrt{4\pi^2 f_0^2 - \alpha_{\text{кк}}^2} = \sqrt{4\pi^2 (12.5 \cdot 10^6)^2 - (1.34 \cdot 10^6)^2} = 7.85 \cdot 10^7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

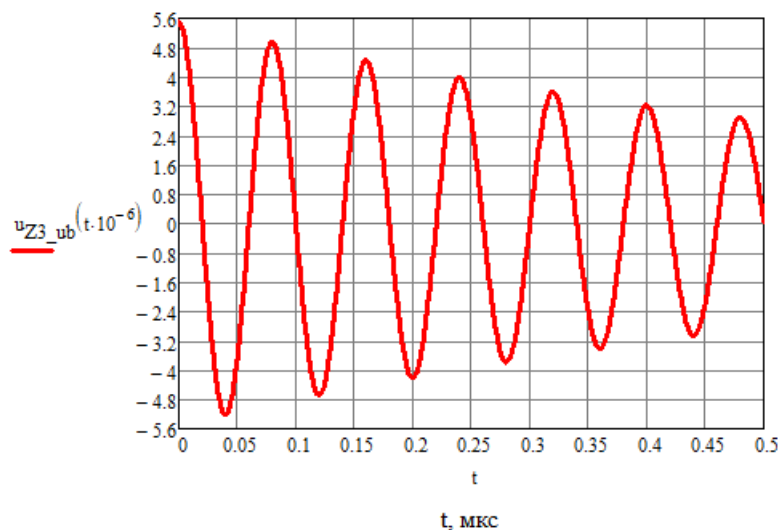


Рисунок 2 – Убывающие колебания $u_{Z3}(t)$ при выключении АГ

При включении АГ:

$$\tau_{\text{KK}} = \frac{1}{\alpha_{\text{KK}}} = \frac{1}{1.34 \cdot 10^6} = 7.46 \cdot 10^{-7} \text{ c}$$

$$\tau_{\text{per}} = \frac{\tau_{\text{KK}}}{F - 1} = \frac{1}{\alpha_{\text{KK}}(F - 1)} = \frac{1}{1.34 \cdot 10^6 \cdot (4 - 1)} = 2.49 \cdot 10^{-7} \text{ c}$$

$$\alpha_{\text{per}} = \frac{1}{\tau_{\text{per}}} = \frac{1}{2.49 \cdot 10^{-7}} = 4.016 \cdot 10^6 \text{ c}$$

$$u_{Z3}(t) = U_{Z3} e^{\frac{t}{\tau_{\text{per}}}} \cos(\omega_{\text{per}} t)$$

$$\omega_{\text{per}} = \sqrt{4\pi^2 f_0^2 - \alpha_{\text{KK}}^2} = \sqrt{4\pi^2 (12.5 \cdot 10^6)^2 - (4.016 \cdot 10^6)^2} = 7.84 \cdot 10^7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

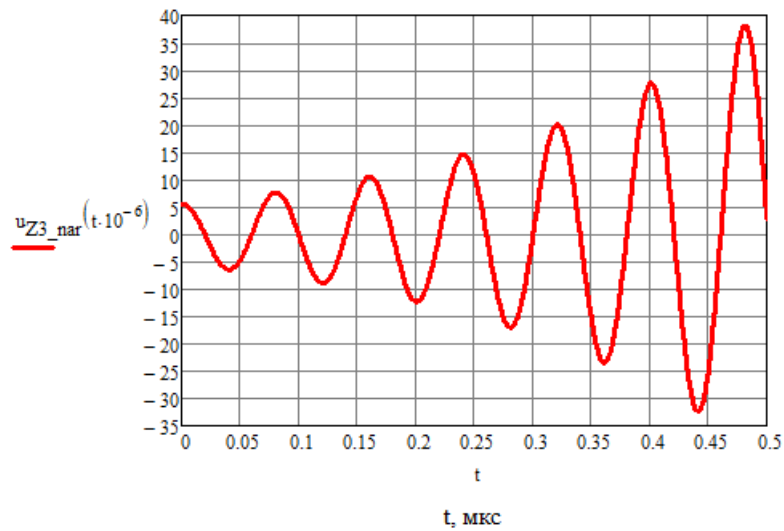


Рисунок 3 – Нарастающие колебания $u_{Z3}(t)$ при включении АГ

Лабораторное задание

1. Измерение характеристик стационарного режима

Настроим схему автогенератора таким образом, чтобы она соответствовала ближайшим к рассчитанным параметрам в домашней подготовке.

Для соответствия режима автогенератора поменяли положения переключателей емкостей на №4, поскольку при рассчитанных в домашней подготовке транзистор был в перенапряженном режиме, а также частота получалась равной около 11.5 МГц, в то время как необходимая частота равна 12.5 МГц.

Внесем полученные значения величин, характеризующих режим работы автогенератора в таблицу.

Таблица 4 – Режим работы АГ

f_0 , МГц	$I_{Э0}R_{см}$, В	$I_{0нач}$, мА	$I_{Э0}R_{см}$, В	$I_{к0}$, мА	Коэф. заплн. $i_{к\sim}(t)$, %	θ , °
12.66	3.44	11.47	3.434	11.45	28	72

Осциллограммы $u_{Z3\sim}(t)$ и $i_{к\sim}(t)$ в заданном режиме:

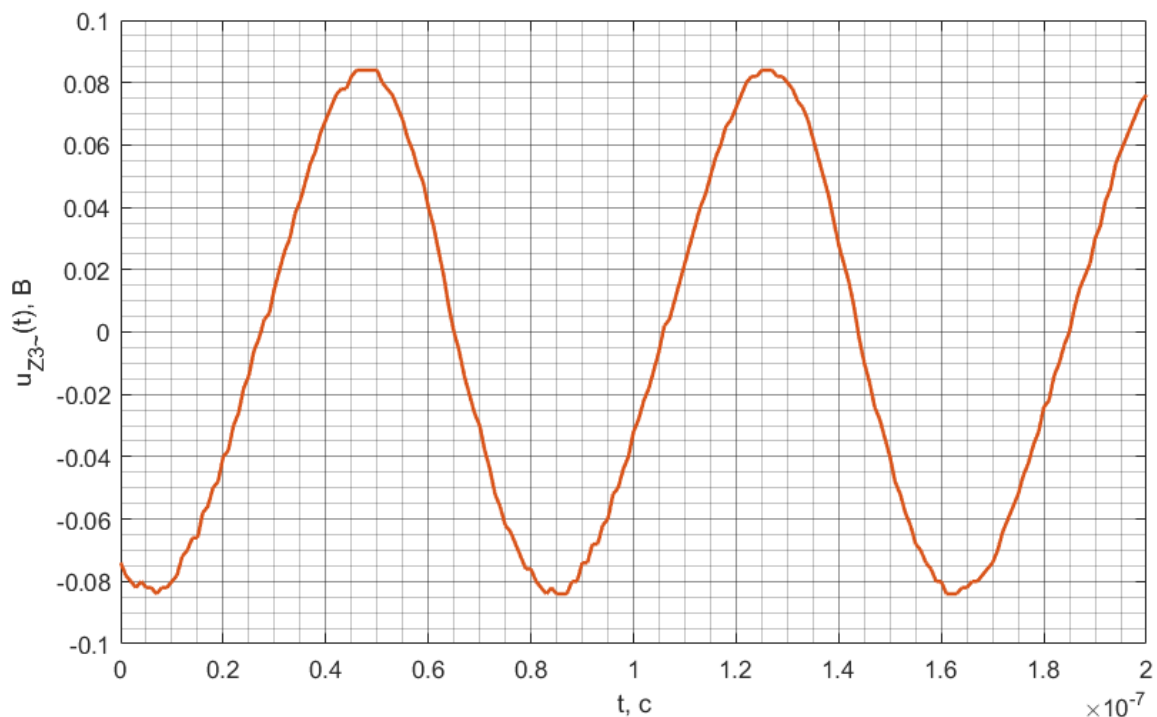


Рисунок 4 – Осциллограмма $u_{Z3\sim}(t)$

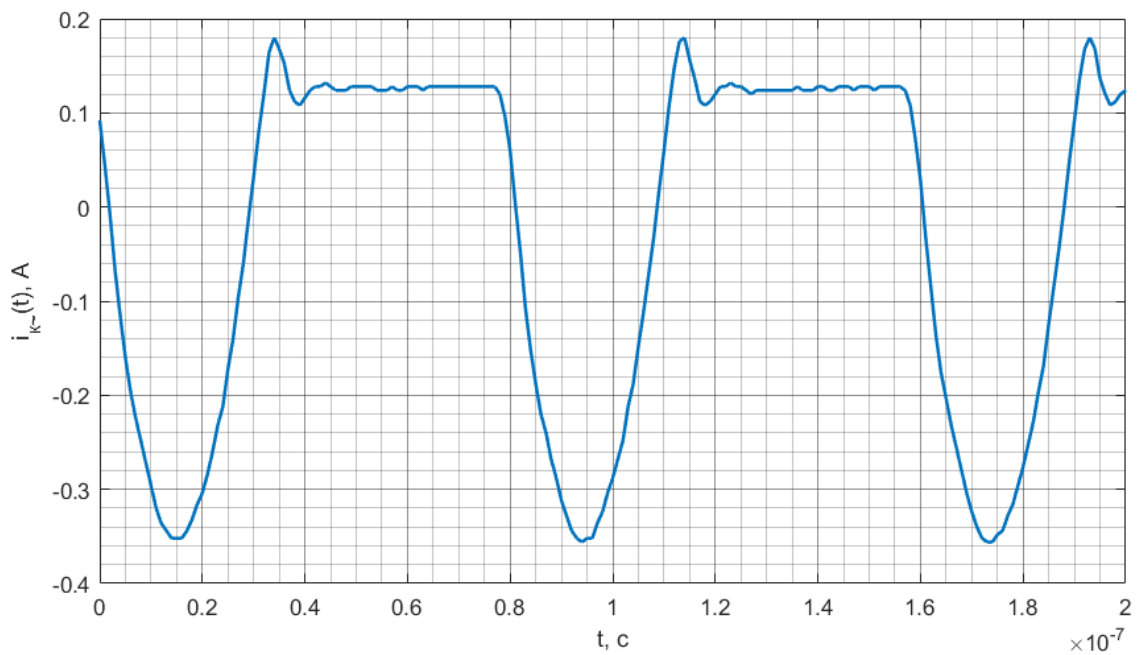


Рисунок 5 – Осциллограмма $i_{k\sim}(t)$

2. Измерение переходных процессов

Подадим прямоугольное колебание от внешнего генератора с параметрами: частота 2 кГц, высокий уровень 3.5 В, низкий уровень 0 В.

Сохраним полученные осциллограммы $i_{k\sim}(t)$ при нарастании и спаде импульса.

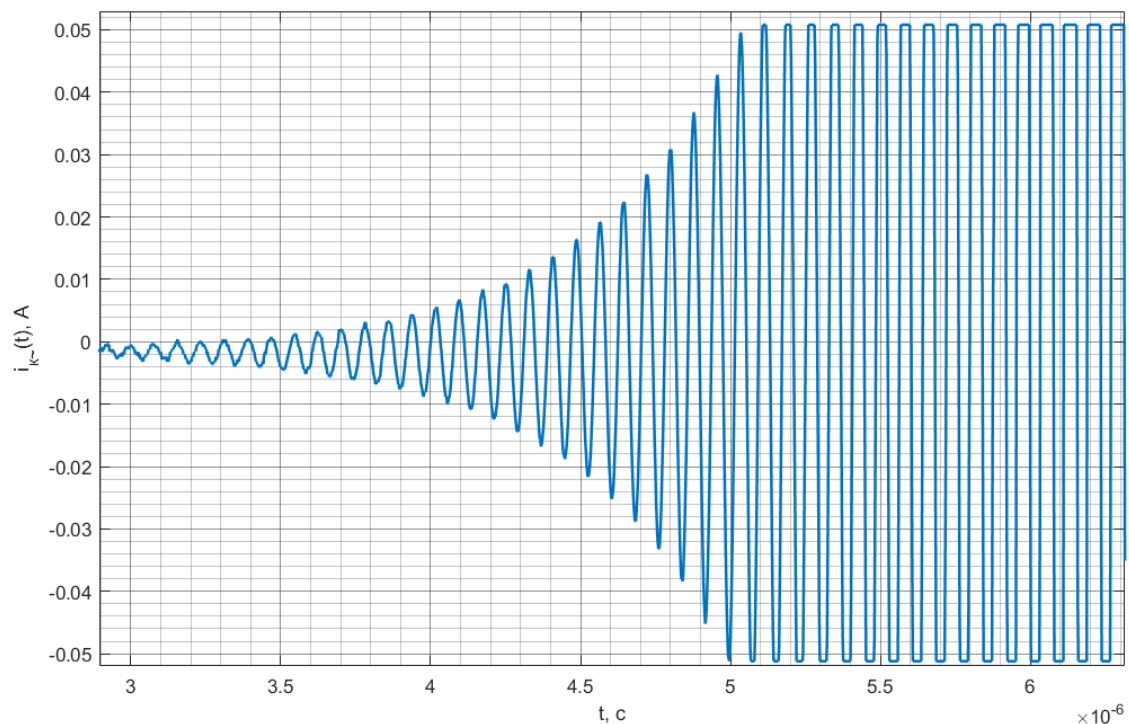


Рисунок 6 – Осциллограмма $i_{k\sim}(t)$ (Нарастание)

$$\tau_{\text{нар}} = 0.398 \text{ мкс}$$

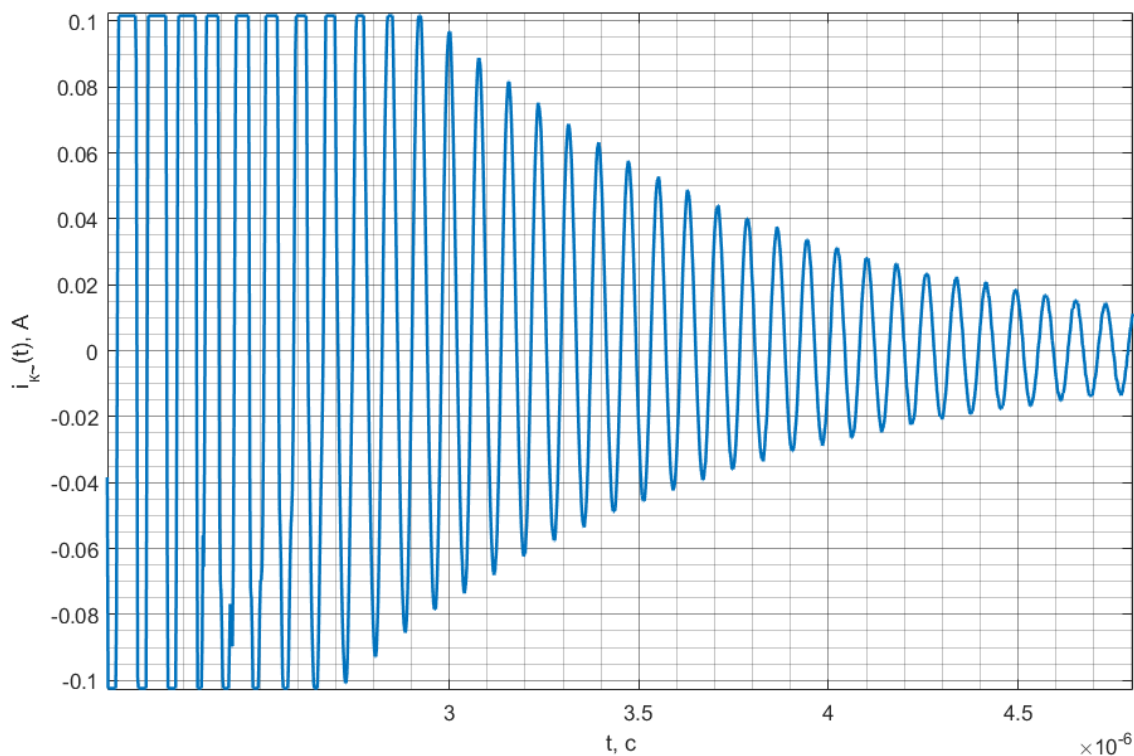


Рисунок 7 – Осциллограмма $i_{k\sim}(t)$ (Спад)

$$\tau_{\text{спад}} = 0.942 \text{ мкс}$$

$$F = \frac{\tau_{\text{спад}}}{\tau_{\text{нар}}} + 1 = 2.4 + 1 = 3.4$$

3. Обработка результатов измерений

Заполним таблицу измерений режима работы автогенератора, используя разложение в ряд Фурье осциллограммы $u_{Z3\sim}(t)$.

Используя быстрое преобразование Фурье в Matlab:

$$U_{Z3} = 3.961 \text{ В}$$

$$I_{0\text{нач}} = \frac{I_{\text{э0нач}} R_{\text{см}}}{R_{\text{см}}} = \frac{3.44}{300} = 11.47 \text{ мА}$$

$$I_{\text{к0}} = \frac{I_{\text{э0}} R_{\text{см}}}{R_{\text{см}}} = \frac{3.434}{300} = 11.45 \text{ мА}$$

Таблица 5 – Режим работы АГ: измерения

f_0 , МГц	$I_{0\text{нач}}$, мА	$I_{\text{к0}}$, мА	U_{Z3} , В
12.66	11.47	11.45	3.961

Заполним таблицу расчета амплитуды по экспериментальным данным, для этого используем F и θ из осциллограмм $i_{k\sim}(t)$, полученных в пунктах 1 и 2.

По углу отсечки в установившемся режиме рассчитаем фактор регенерации:

$$\gamma_1(\theta) = F^{-1}$$

$$F = \frac{1}{\gamma_1(72^\circ)} = \frac{1}{0.306} = 3.268$$

По фактору регенерации при переходных процессах рассчитаем угол отсечки:

$$\gamma_1(\theta) = \frac{1}{3.4} = 0.294$$

$$\theta = 70.752^\circ$$

Рассчитаем амплитуду U_{Z3} при переходных процессах:

$$V_1 = \frac{I_{0\text{нач}}(1 + A)}{S[A\gamma_0(\theta) - \cos(\theta)]} = \frac{0.01147 \cdot (1 + 15)}{0.05 \cdot [15 \cdot \gamma_0(70.752^\circ) - \cos(70.752^\circ)]} = 1.642 \text{ В}$$

$$k_{\text{эксп}} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{302}{440} = 0.6863$$

$$U_{Z3} = V_1(1 + k^{-1}) = 1.642 \cdot \left(1 + \frac{1}{0.6863}\right) = 4.035 \text{ В}$$

Таблица 6 – Режим работы АГ: расчет амплитуды по экспериментальным данным

	Данные для расчета	F	$\theta, ^\circ$	$U_{Z3}, \text{ В}$
1	Осциллограмма $i_{k\sim}(t)$ из п.1: форма тока в установившемся режиме	3.268	72	3.961
2	Осциллограмма $i_{k\sim}(t)$ из п.2: переходные процессы	3.4	70.752	4.035

Выводы: В ходе выполнения лабораторной работы были исследованы режимы работы автогенератора, собранного по схеме Клаппа. Было отмечено, что при изменении емкости C_3 изменяется только частота генерируемого колебания (при $C_3 = 36$ пФ $f_0 = 11.5$ МГц, а при $C_3 = 27$ пФ $f_0 = 12.66$ МГц), а изменение емкостей C_1 , C_2 приводит к изменению режима работы автогенератора. По осциллограммам переменной составляющей тока коллектора при переходных процессах были рассчитаны постоянные времени, из которых в свою очередь был рассчитан фактор регенерации, равный 3.4, в то время как заданный фактор регенерации в подготовке был равен 4. Не получилось настроить автогенератор на нужный фактор регенерации, поскольку при рассчитанных значениях конденсаторов транзистор попадал в перенапряженный режим, на это влияет то, что крутизна, используемая в расчетах, вероятнее всего не соответствует реальной крутизне транзистора.