

LC-автогенератор

СОКРАЩЕНИЯ

- АГ – автогенератор
- АЭ – активный элемент

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $\alpha \parallel \beta = \frac{\alpha\beta}{\alpha+\beta}$
- θ – угол отсечки
- ω_0 – частота колебаний АГ
- $\omega_{\text{кк}}$ – частота свободных колебаний колебательного контура
- ω_p – резонансная частота колебательного контура
- A – фактор автосмещения
- C – общая ёмкость колебательного контура
- F – фактор регенерации
- $E_{\text{вн}}$ – напряжение источника внешнего смещения
- $E_{\text{п}}$ – напряжение питания
- $k = \frac{X_2}{X_1}$ – коэффициент обратной связи
- v – напряжение, управляющее током произвольного АЭ
- V_0 – постоянная составляющая v (напряжение смещения)
- V_1 – первая гармоника v
- S – крутизна характеристики АЭ
- $Q_i = \frac{|X_i|}{r_i}$ – добротность двухполюсника с импедансом $r_i + jX_i$

СООТНОШЕНИЯ

- $\gamma_0(\theta) = \frac{1}{\pi} (\sin \theta - \theta \cos \theta)$
- $\gamma_1(\theta) = \frac{1}{\pi} \left(\theta - \frac{\sin(2\theta)}{2} \right)$
- $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$
- $\cos \theta = \frac{E' - V_0}{V_1}$
- Коэффициент заполнения последовательности косинусоидальных импульсов: $\frac{1}{\pi} \arccos \left(\frac{1 + \cos \theta}{2} \right)$

1 Теория

Автогенератор (АГ) – это устройство, обеспечивающее на своём выходе периодические электромагнитные колебания с частотой f_0 при использовании энергии только от источника питания постоянного тока.

LC-АГ – это вид АГ, в котором для генерирования колебаний свойства используются высокодобротного колебательного контура. На умеренно высоких частотах (до первых сотен МГц) контур выполняют из катушек индуктивности и конденсаторов.

1.1 Регенерация колебательного контура

Колебательная система, состоящая из индуктивности L с *малыми* потерями r и конденсатора с ёмкостью C , рассеивает накопленную энергию, проявляя при этом *затухающие* колебания, например, напряжения на конденсаторе (Рисунок 1):

$$u_{\text{кк}}(t) = U(0) e^{-\alpha_{\text{кк}} t} \cos \omega_{\text{кк}} t, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{кк}} = \frac{r}{2L}$, $\omega_{\text{кк}} = \sqrt{\omega_p^2 - \alpha_{\text{кк}}^2}$ – частота свободных колебаний колебательного контура, $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота колебательного контура.

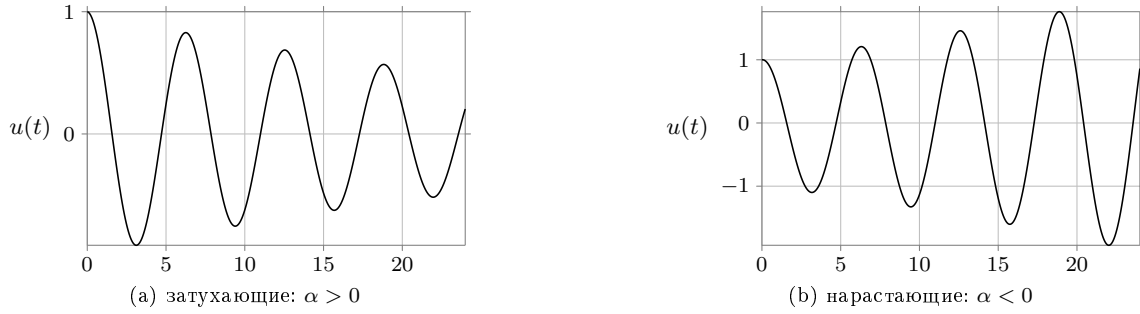


Рисунок 1 – Свободные колебания в LC-контуре: $u(t) = U(0) e^{-\alpha t} \cos \omega_{\text{кк}} t$

Для роста накопленной энергии достаточно добавить в контур отрицательное сопротивление $r_{\text{рег}}$, такое что $|r_{\text{рег}}| > r$. Тогда показатель экспоненты станет положительным, а колебания нарастающими (Рисунок 1).

Отрицательное сопротивление можно получить разбив ёмкость C на две (C_1 и C_2 , причём $C = C_1 || C_2 = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$) и добавив к ним источник тока $i(v)$, управляемый напряжением v , как показано на рисунке 2а. Предположив, что $i(v) = Sv$, рассмотрим импеданс двухполюсника, образованного двумя ёмкостями и источником тока Z (для этого нужно найти напряжение на его зажимах $u_{\text{кк}}(t)$ при воздействии синусоидальным током $i_{\text{кк}}(t)$):

$$Z = (1 + SjX_2)jX_1 + jX_2 = -SX_1X_2 + j(X_1 + X_2),$$

где X_1 и X_2 – реактансы конденсаторов с соответствующими номерами.

Эквивалентная схема двухполюсника представляет собой последовательное соединение ёмкости C и *отрицательного* сопротивления $r_{\text{рег}} = -SX_1X_2$. Мера восполнения потерь в контуре (регенерации контура)

$$F = \frac{SX_1X_2}{r} \quad (2)$$

имеет название *фактор регенерации*. Если $F > 1$, в контуре возникают нарастающие колебания.

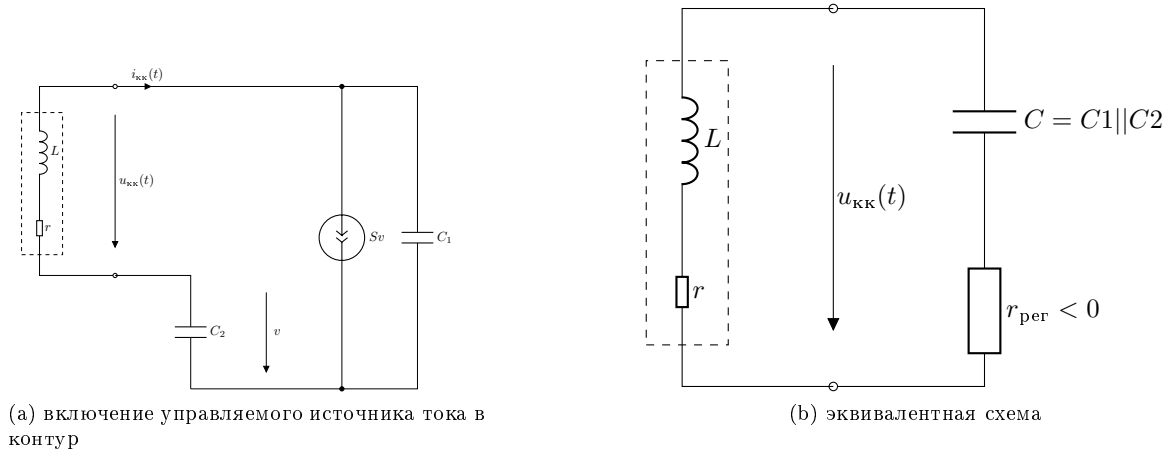


Рисунок 2 – Регенерация LC-контура

Такой способ получения отрицательного сопротивления требует подключения *трёхполюсного* активного элемента (АЭ) (транзистора, лампы). Схемы, основанные на этом способе регенерации контура, называются *трёхточечными*, или просто *трёхточками*.

1.2 Частота и амплитуда колебаний автогенератора

Очевидно, что если в приведённых выше рассуждениях поменять местами индуктивность и конденсатор, и разбить индуктивность L на две L_1 и L_2 , то (2) по-прежнему будет верно, и контур может быть регенерирован. То, какой элемент контура разделяется на два, определяет классификацию трёхточечных схем: схема с двумя ёмкостями – это *ёмкостная* трёхточка, с двумя индуктивностями – *индуктивная* трёхточка. Таким образом в общем виде такая схема содержит три двухполюсника и один трёхполюсный АЭ (Рисунок 3).

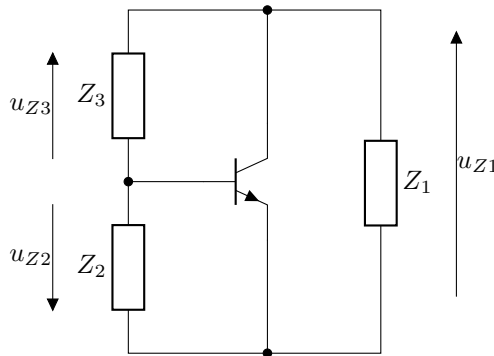


Рисунок 3 – Схема трёхточки по переменному току с биполярным транзистором в качестве АЭ

Импедансы двухполюсников $Z_i = r_i + jX_i$ выбираются так, чтобы составленный из них контур оказался высокодобротным ($Q_{kk} > 10...20$). Выполнение этого условия позволяет считать форму всех напряжений синусоидальной при инженерном расчёте АГ. Также это даёт возможность получать с хорошей точностью частоту колебаний АГ f_0 , считая её равной резонансной частоте контура без потерь, то есть как решение уравнения

$$\sum_i X_i(f_0) = 0. \quad (3)$$

Если известна амплитуда управляющего напряжения V_1 (см. пп.1.4, 1.5), то амплитуды напряжений u_{Z1} , u_{Z2} и u_{Z3} определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned}U_{Z2} &= V_1, \\U_{Z1} &= k^{-1}V_1, \\U_{Z3} &= (1 + k^{-1}) V_1,\end{aligned}$$

где $k = \frac{X_2}{X_1}$ – коэффициент обратной связи.

1.3 Переходные процессы при включении и выключении АГ

Если разомкнуть какое-либо соединение АЭ с контуром, то амплитуда колебаний начнёт экспоненциально *убывать* во времени:

$$U(0) e^{-\frac{t}{\tau_{\text{кк}}}},$$

где $\tau_{\text{кк}} = \frac{1}{\alpha_{\text{кк}}}$. В течение любого интервала времени $\tau_{\text{кк}}$ амплитуда изменится в $e=2,718...$ раз.

Если восстановить разомкнутое соединение, то амплитуда колебаний начнёт экспоненциально *возрастать* во времени:

$$U(0) e^{\frac{t}{\tau_{\text{пер}}}},$$

где $\tau_{\text{пер}} = \frac{1}{\alpha_{\text{пер}}} = \frac{\tau_{\text{кк}}}{F-1}$. В течение любого интервала времени $\tau_{\text{пер}}$ амплитуда изменится в $e=2,718...$ раз.

По временным зависимостям переходных процессов можно определить $\tau_{\text{кк}}$ и $\tau_{\text{пер}}$, а по отношению последних, найти F .

1.4 Нелинейный режим работы

Рост амплитуды колебаний в линейной системе нельзя остановить. Но наличие нелинейной характеристики $i(v)$ приводит к замедлению роста амплитуды колебаний и последующему установлению её стационарного значения. В случае кусочно-линейной зависимости $i(v)$

$$i(v) = \begin{cases} 0, & v < E' \\ Sv & v \geq E' \end{cases}$$

отсечка тока вызовет такое снижение поступающей от АЭ мощности, что угол отсечки θ в стационарном режиме будет удовлетворять уравнению

$$\gamma_1(\theta) = F^{-1}. \quad (4)$$

Особенностью этого уравнения является то, что его решение определяет только *форму* тока АЭ в установившемся режиме. Для полного описания стационарного режима необходимо добавить как минимум одно уравнение. Оно получается из выражения для θ :

$$V_1 \cos \theta = E' - V_0, \quad (5)$$

где V_0 – постоянная составляющая $v(t)$ или напряжение смещения, V_1 – первая гармоника $v(t)$. Поскольку θ задано уравнением (4), то, зная V_0 , из (5) можно определить амплитуду установившихся колебаний. В простейшем случае, когда V_0 задаётся внешним источником ЭДС $E_{\text{вн}}$ (*внешнее смещение*), (4) решается после подстановки $V_0 = E_{\text{вн}}$. В условиях обсуждаемой задачи необходимо, чтобы $E_{\text{вн}} > E'$, то есть, чтобы внешнее смещение обеспечивало рабочую точку на наклонном участке ВАХ. Поскольку $E' - E_{\text{вн}} < 0$, то и $\cos \theta < 0$. Следовательно, решение (5) возможно только для $\frac{\pi}{2} < \theta < \pi$ и, следовательно, имеет смысл только при $1 < F < 2$.

1.5 Автосмещение

Чтобы сделать возможными решения при $F \geq 2$, нужно обеспечить зависимость V_0 от V_1 . Для этого в цепь протекания постоянной составляющей тока АЭ I_0 включают сопротивление $R_{\text{см}}$ так, чтобы напряжение смещения убывало при возрастании I_0 , так что

$$V_0 = E_{\text{вн}} - R_{\text{см}} I_0.$$

Подставив это выражение в (5) и используя $I_0 = SV_1\gamma_0(\theta)$, получим

$$\frac{E_{\text{вн}} - E'}{V_1} = A\gamma_0(\theta) - \cos\theta,$$

где $A = SR_{\text{см}}$ – фактор автосмещения. Для практического расчёта это выражение лучше переписать в виде

$$\frac{I_{0\text{нач}}}{SV_1} = \frac{A\gamma_0(\theta) - \cos\theta}{1 + A}, \quad (6)$$

где $I_{0\text{нач}} = S(V_{0\text{нач}} - E')$ – значение I_0 до включения АГ, $V_{0\text{нач}} = E_{\text{вн}} - R_{\text{см}}I_{0\text{нач}}$ – значение V_0 до включения АГ, поскольку $I_{0\text{нач}}$ весьма легко измеряется в реальных схемах АГ. В выводе (6) было использовано промежуточное равенство

$$E_{\text{вн}} = V_{0\text{нач}} + A(V_{0\text{нач}} - E').$$

2 Лабораторный стенд

2.1 Общее описание

В состав лабораторного стенда входят печатная плата и измерительные приборы: осциллограф и мультиметр.

Все необходимые при выполнении работы элементы находятся на верхнем слое печатной платы (Рисунок 4). Поверхность слоя разделена на прямоугольные поля. Каждое поле снабжено подписью, указывающей на функциональное назначение элементов, находящихся внутри поля. Подписи рассчитаны на предварительное знакомство с темой, внимательность и желание использовать когнитивные способности.

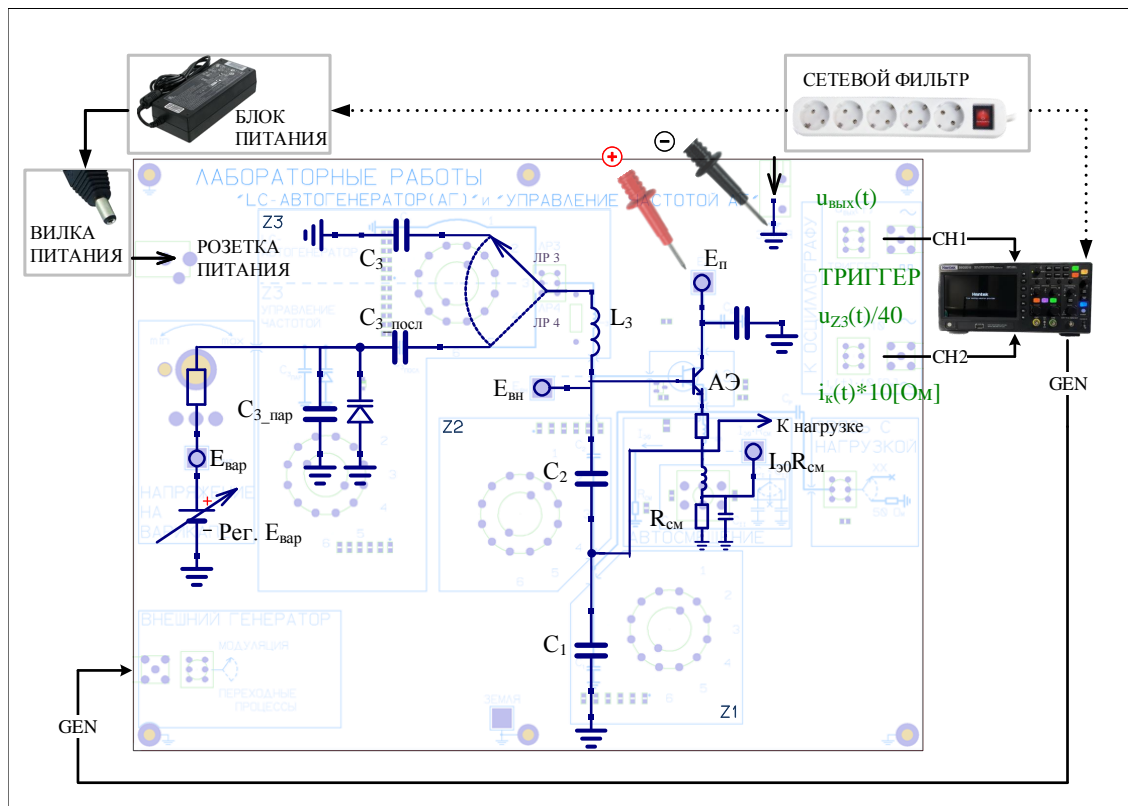


Рисунок 4 – Вид верхнего слоя печатной платы для лабораторных работ «LC-автогенератор» и «Управление частотой автогенератора»

Питание осуществляется от блока питания постоянного напряжения в диапазоне $+(12...24)$ В. Разъём (розетка) для подключения блока питания находится в левом верхнем углу платы. На рисунке 4 он подписан «РАЗЪЁМ ПИТАНИЯ».

Физически контакт «Земля» – это значительная часть нижнего металлического слоя платы. Элементы на верхнем слое соединяются с землёй через металлизированные отверстия.

Поскольку плата предназначена для выполнения двух лабораторных работ, на одном занятии используются не все переключатели и тумблеры. Для лабораторной работы «LC-автогенератор» используется схема, показанная на рисунке 5. В основе её – ёмкостная трёхточка в модификации, которая называется схемой Клаппа: то есть когда элемент Z_3 состоит из последовательного соединения индуктивности и конденсатора (элементы L_3 и C_3 соответственно).

Ключ **Кл1** служит для подключения АЭ к контуру или для разрыва этого соединения. Замыкание и размыкание Кл1 включает и выключает АГ и может служить для наблюдения переходных процессов.

Напряжение питания АГ $E_{\text{п}} = 9$ В. Внешнее смещение $E_{\text{вн}}$ задаётся резистивным делителем.

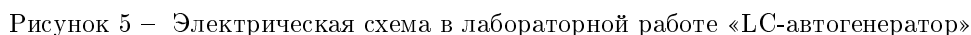


Таблица 1: Номиналы элементов трёхточки

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)

2.2.4 Связь автогенератора с внешней цепью (Поле СВЯЗЬ С НАГРУЗКОЙ)

В положении тумблера **XX** автогенератор связан с помощью разделительного конденсатора со входом осциллографа, и, следовательно, $u_{\text{вых}}(t) = u_{Z1\sim}(t)$. В положении тумблера **50 Ом** параллельно входу осциллографа подключается сопротивление 50 Ом, имитирующее нагрузку, создаваемую подключённым к АГ каскадом.

2.2.5 Включение и выключение автогенератора (Поле ВНЕШНИЙ ГЕНЕРАТОР)

Если тумблер этого поля находится в положении **ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**, то подача низких ($< 0,3$ В) и высоких (> 3 В) уровней напряжения через SMB разъём, расположенный в этом поле, будет размыкать и замыкать ключ **Кл1**. Выход внешнего генератора, расположенного на лицевой панели осциллографа, подключается к SMB разъёму с помощью кабеля.

2.3 Настройка внешнего генератора

2.3.1 Включение/выключение

Осциллограф снабжён генератором, способным формировать колебания различной формы. Выход генератора включается и выключается нажатиями кнопки **WAVE GEN**. Если кнопка подсвечена, выход включён, в противном случае – выключен.

2.3.2 Выбор формы колебания

При нажатии кнопки **WAVE GEN** появляется меню, вкладки которого выбираются нажатием клавиш **F1...F6**. Используя эти вкладки можно настроить:

- форму напряжения;
- частоту колебаний;
- параметры формы напряжения;
- наличие или отсутствие модуляции (для этого нажатием **F6** перейти на вторую страницу вкладок и выбрать вкладку **modulation**).

Перестройка частоты и параметров формы напряжения осуществляется вращением ручки **V0**. Для грубой перестройки частоты выбрать подвкладку **Frequency**, для более точной – подвкладку **Fine Frequency**.

2.3.3 Настройка модуляции

Для настройки нажатием **F6** перейти на вторую страницу вкладок и выбрать вкладку **modulation**. Для применения модуляции выбрать **ON**, для отключения её – **OFF**.

Виды модуляции:

- синусоидальная: **Sine**;
- треугольная: **Ramp**;
- прямоугольная: **Square**.

Перестройка частоты модуляции и девиации осуществляется *вращением* ручки **V0**. Выбор десятичного знака для перестройки осуществляется так:

- *нажать* ручку **V0**;
- *вращением* ручки **V0** выбрать десятичный знак;
- *нажать* ручку **V0**.

Чтобы вернуться в меню общих настроек генератора нажатием **F6** перейти на вторую страницу вкладок модуляции и выбрать вкладку **return**).

2.3.4 Источник постоянного напряжения

Генератора может быть настроен так, чтобы на его выходе поддерживался заданный уровень постоянного напряжения. Для этого после нажатия кнопки **WAVE GEN** нужно нажатиями **F1** выбрать DC. Затем *вращением* ручки **V0** установить требуемый уровень напряжения.

2.4 Проведение измерений

2.4.1 Измерение средних значений напряжения ($E_{вн}$, $I_{э0}R_{см}$, $E_{п}$)

Предусмотрено измерение средних значений напряжения с помощью мультиметра, работающего в режиме *вольтметра* (режим работы мультиметра: \overline{V}). Измеряется напряжение относительно контакта **ЗЕМЛЯ** (\perp) на металлизированной площадке с названием, соответствующим искомой величине. Для проведения измерения нужно коснуться щупом квадратной металлизированной площадки, снабжённой подписью, соответствующей обозначению измеряемой величины (см. рисунок 4).

Значения постоянных напряжений получаются непосредственным считыванием показаний мультиметра.

2.4.2 Измерение осциллограмм ($u_{вых\sim}(t)$, $u_{Z3\sim}(t)$, $i_{к\sim}(t)$)

Предусмотрено выведение масштабированных временных зависимостей напряжений $u_{вых\sim}(t)$ (масштаб 1 В:1 В), $u_{Z3\sim}(t)$ (масштаб 1 В:40 В) и тока коллектора $i_{к\sim}(t)$ (масштаб 1 В:100 мА). Масштабы указаны на плате. Выведение требуемой осциллограммы осуществляется переключением тумблеров в поле **К ОСЦИЛЛОГРАФУ**. Рычаг тумблера наклонён в сторону надписи, соответствующей измеряемой осциллограмме. Значок \sim означает, что осциллограмма не содержит постоянную составляющую.

Примечание. Осциллограмма тока коллектора $i_{к\sim}(t)$ *инвертирована* относительно действительного направления тока $i_{к}$, то есть зависимость « $i_{к\sim}(t)$ » получается в результате протекания тока $-i_{к}(t)$ через измерительное сопротивление. Для переворачивания осциллограммы нажать на клавишу меню канала (**CH1 MENU** или **CH2 MENU**), затем нажатием **F5** добиться **Invert** \rightarrow **ON**.

3 Задание для подготовки к работе в лаборатории

3.1 Исходные данные

Дано: АГ по схеме на рисунке 5 и некоторые величины, определяющие режим его работы (см. таблицу 2).

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			12	9			

3.2 Расчётное задание

1. Рассчитать величины ёмкостей элементов C_1 , C_2 , C_3 контура АГ и внести их таблицу 3. На режим работы АГ и элементы контура накладываются следующие ограничения:
 - все конденсаторы без потерь;
 - импеданс индуктивности L_3 содержит действительную часть 15 Ом;
 - $F = 4$;
 - $C_1 = \frac{2}{3}C_2$.
2. Внести в таблицу 3 номиналы из таблицы 1, ближайшие по значениям к рассчитанным, и соответствующие им номера положений переключателей.
3. Заполнить таблицу 2.
4. Построить осциллограммы переходных процессов $u_{Z3}(t)$ при включении и выключении АГ. По оси t откладывать время в микросекундах.

Таблица 3: Ёмкости конденсаторов контура АГ

Номер положения переключателя	C_1 , пФ	C_2 , пФ	C_3 , пФ
Расчёт			
Номиналы из таблицы 1			
Положения переключателей			

3.3 Содержание подготовки к работе в лаборатории

Лист (один!) с графиками переходных процессов. Допускается использование дополнительных листов с пояснениями к расчётам.

Для облегчения выполнения задания в лаборатории рекомендуется иметь с собой лист с распечатанным **Заданием для выполнения в лаборатории** (см. соответствующий раздел).

4 Задание для выполнения в лаборатории

4.1 Исходное состояние

1. Поле **ВНЕШНИЙ ГЕНЕРАТОР**: установить тумблер в положение **ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ**.
2. Поле **Z3**: установить тумблер в положение **ЛРЗ**.
3. Поле **АВТОСМЕЩЕНИЕ**: установить тумблер в среднее положение.
4. Поле **СВЯЗЬ С НАГРУЗКОЙ**: установить тумблер в положение **ХХ**.
5. Мультиметр перевести в режим *вольтметра* (режим работы мультиметра: $\overline{\overline{V}}$). В дальнейшем *все измерения с помощью мультиметра* проводить в этом режиме.
6. Подать питание, подключив *вилку* питания к *розетке* в левом верхнем углу платы.
7. Соединить кабелями разъёмы на плате с разъёмами осциллографа, как показано на рисунке 4.
8. Включить осциллограф. После загрузки нажать кнопку **DEFAULT SETUP**.
9. Нажать кнопку **TRIG MENU**, затем нажатиями **F2**, выбрать CH2.
10. Нажатиями кнопки **CH1 MENU** отключить канал 1 (Кнопка перестанет подсвечиваться).

4.2 Измерение характеристик стационарного режима

1. Установить переключателями в полях **Z1**, **Z2**, **Z3** значения номиналов конденсаторов, ближайшие к рассчитанным при домашней подготовке.
2. Внести значения величин, характеризующих установившийся режим работы автогенератора, в таблицу 4 и сохранить осциллограммы (см. п. 2.4):
 - $u_{Z3\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv
 - $i_{K\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv

Примечание. Для устойчивых показаний измерения частоты (в третьем-четвёртом знаке) можно включить статистику измерений и воспользоваться средним значением (Avg) частоты. Для этого нажать **MEASURE**, затем нажатием **F4** добиться **Statistics** → **ON**.

Примечание. Для получения стабильного изображения на экране осциллографа использовать (вращать) ручку **TRIG LEVEL**.

Примечание. Для переворачивания осциллограммы нажать **CH2 MENU**, затем нажатием **F5** добиться **Invert** → **ON**.

Таблица 4: Режим работы АГ

f_0 , МГц	$I_{э0нач} R_{см}$, В	$I_{0нач}$, мА	$I_{э0} R_{см}$, В	I_{K0} , мА	Коэф. заполнения $i_{K\sim}(t)$, %	θ , °

4.3 Измерение переходных процессов

1. Нажатиями кнопки **CH1 MENU** включить канал 1.
2. Нажать кнопку **TRIG MENU**, затем нажатиями **F2**, выбрать CH1.
3. Подать колебание от внешнего генератора на (п. 2.3 настоящего описания). Форма напряжения: прямоугольная. Частота 2 кГц. Высокий уровень (**High Level**, выбирается во вкладке напротив кнопки **F3**): 3,5 В. Низкий уровень (**Low Level**; выбирается во вкладке напротив кнопки **F4**): 0 В.
4. Вывести на канал 1 осциллографа напряжение ТРИГГЕР.
5. Нажать кнопку **TrigMenu**, далее нажатиями **F3** выбрать **Rising**.
6. Масштабируя и смещая по горизонтали и по вертикали осциллограмму $i_{\kappa\sim}(t)$, добиться наблюдения на экране её отрезка, содержащего экспоненциальное изменение амплитуды в три-четыре раза. В результате масштаб по вертикали должен получиться 10 мВ в клетке.
7. Сохранить осциллограмму $i_{\kappa\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv и оценить значение постоянной времени переходного процесса _____ мкс.
Примечание. Перед сохранением можно остановить развёртку нажатием кнопки **RUN STOP**. После сохранения развёртка запускается повторным нажатием кнопки **RUN STOP**.
8. Нажать кнопку **TrigMenu**, далее нажатиями **F3** выбрать **Falling** и повторить предыдущие два пункта, сохранив осциллограмму $i_{\kappa\sim}(t)$ в файл с названием _____ .csv и оценив значение постоянной времени переходного процесса _____ мкс.

4.4 Измерение при выключенном автогенераторе

1. Нажать кнопку **WAVE GEN**.
2. Нажатиями **F1** выбрать DC.
3. Нажать **F4** и установить уровень вращением ручки **V0** постоянного напряжения 3,5 В.
4. Внести значение $I_{э0нач} R_{см}$ в таблицу 4.

4.5 Завершение работы

1. Выключить выход внешнего генератора, выключить осциллограф, отсоединить вилку питания от платы.

5 Обработка результатов измерений

1. Заполнить таблицу 5. Амплитуду U_{Z3} найти, используя разложение в ряд Фурье осциллограммы $u_{Z3\sim}(t)$.

Таблица 5: Режим работы АГ: измерения

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

2. Заполнить таблицу 6. В качестве исходных данных для нахождения F и θ использовать:
 - для заполнения строки 1 – данные из п. 4.2 (учесть, что выброс после отрезка косинуса вызван особенностями измерительных цепей и не должен учитываться при определении высоты импульса);
 - для заполнения строки 2 – данные из п. 4.3.

Таблица 6: Режим работы АГ: расчёт амплитуды по экспериментальным данным

	Данные для расчёта	F	θ , град	U_{Z3} , В
1	Осциллограмма $i_{к\sim}(t)$ из п. 4.2: форма тока в установившемся режиме			
2	Осциллограммы $i_{к\sim}(t)$ из п. 4.3: переходные процессы			

3. Привести все промежуточные выкладки, понадобившиеся при выполнении предыдущего пункта (расчёты, обработанные осциллограммы и т. п.)
4. Высказать предположения о причинах отличия результатов измерений и расчёта. **Допускаются только толкования и гипотезы, подкреплённые формулами и численными оценками. Например, упоминание погрешности, вносимой измерительным прибором, нужно обозначить символом и поместить его в уравнение, где погрешность оказывает влияние. Затем в качестве примера указать для какого-либо измерения ожидаемое численное значение погрешности. В случае невозможности получения убедительных выводов упомянуть об этом явно.**

Примечание. Отчёт выполняется в виде файла .pdf. Величины, отложенные по осям графиков, описывать словами, а не буквенными обозначениями. Через запятую написать размерность.