

Краткие указания по выполнению лабораторных работ практикума по радиоэлектронике

1 Аналоговые схемы

Приведены краткие указания по выполнению лабораторных работ практикума по радиоэлектронике из раздела аналоговых схем. Подробные описания лабораторных работ см. в учебном пособии "Практикум по радиоэлектронике", изд. МГУ, 1997 г., (далее – "Пособие").

Необходимые приборы для выполнения заданий

1. Источник питания.
2. Генератор низких частот.
3. Осциллограф.
4. Цифровой вольтамперомметр.
5. Измеритель параметров транзисторов.
6. Измеритель емкостей конденсаторов.

Краткое описание работы приборов дано на стр. 203 – 205 "Пособия".

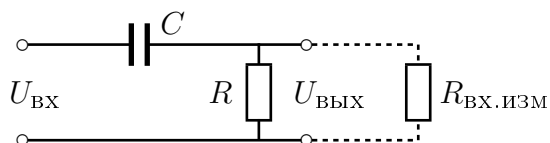
Лабораторная работа 1. Линейные RC -цепи

1. Измерение АЧХ и ФЧХ RC -цепи с омическим выходом

RC -цепь с омическим выходом (*дифференцирующая цепь*) используется для разделения переменных и постоянных составляющих сигналов и для ограничения спектра сигналов в области низких частот.

Типовое задание: значение нижней граничной частоты f_H по уровню 3 дБ от максимального коэффициента передачи

Рис. 1.1 RC -цепь с омическим выходом



1.1. По заданному значению f_H выберите параметры R и C , используя формулу

$$2\pi f_H RC = 1$$

и учитывая, что входное сопротивление измерительного прибора (осциллографа или цифрового вольтметра) R не должно влиять на результаты измерений. (Поэтому необходимо выбрать $R \ll R_{\text{вх.изм.}}$). Измерьте фактические значения емкости конденсатора и сопротивления резистора и соберите цепочку.

1.2. Подайте на вход цепочки сигнал с генератора низких частот и снимите зависимость модуля и аргумента коэффициента передачи от частоты f .

Амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) можно измерять цифровым вольтметром или осциллографом.

Для измерения фазочастотной характеристики (ФЧХ) удобно использовать двухлучевой осциллограф. На один из Y -входов осциллографа подайте сигнал с выхода генератора, а на другой Y -вход – сигнал с выхода цепочки. В этом случае на экране осциллографа будут наблюдаться две синусоиды, сдвинутые относительно друг друга. Набег фазы (в градусах) будет равен

$$\Delta\varphi = 360^\circ \Delta L/L,$$

где L – длина периода, ΔL – горизонтальный сдвиг сигналов, измеренные на экране осциллографа для каждой частоты.

Набег фазы можно также определить по фигурам Лиссажу. Осциллограф переводится в режим *внешней развертки*, на вход X подается сигнал с выхода генератора, а на Y -вход – сигнал с выхода цепочки. В этом случае на экране осциллографа будет наблюдаться эллипс. Фазовый сдвиг равен

$$\Delta\varphi = \arcsin(y_1/y_2),$$

где y_1 – ордината точки эллипса при $x = 0$, y_2 – ордината точки эллипса, в которой $dy/dx = 0$. Центр эллипса соответствует координатам $(0, 0)$. Знак $\Delta\varphi$ при таком способе измерения не определяется.

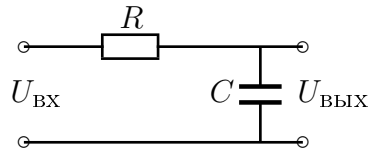
1.3. Сравните экспериментальные кривые с расчетными (прогр. **dif_rc.exe**).

2. Измерение АЧХ и ФЧХ RC - цепи с емкостным выходом

RC -цепь с емкостным выходом (*интегрирующая цепь*) используется для ограничения спектра сигнала на высоких частотах и сглаживания сигналов.

Типовое задание: значение верхней граничной частоты f_B по уровню 3 дБ от максимального коэффициента передачи

Рис. 1.2. RC -цепь с емкостным выходом



2.1. Выполните задание, аналогичное пп. 1.1 – 1.3. В этом случае параметры цепочки рассчитываются по значению f_B по формуле

$$2\pi f_B RC = 1.$$

Для сравнения с экспериментом используется программа `int_rc.exe`.

3. Измерение АЧХ и ФЧХ цепи Вина

На низких частотах цепь Вина ведет себя как простая RC -цепь с омическим выходом, а на высоких частотах – как простая цепь с емкостным выходом. Такие цепи используются в качестве низкодобротных полосовых фильтров, а также в качестве фазоселективных элементов в схемах генераторов гармонических колебаний.

Типовое задание: значение квазирезонансной частоты f_0 цепи Вина

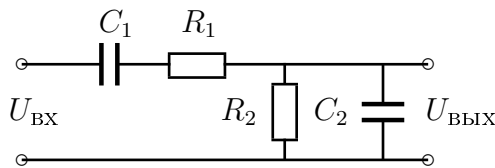


Рис. 1.3. Цепь Вина

3.1. По заданному значению частоты

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

рассчитайте параметры цепочки Вина для случая

$$R_1 = R_2, \quad C_1 = C_2$$

и соберите ее.

3.2. Выполните задание аналогичное п. 1.2.

3.3. Вызовите программу `win-circ.exe` на компьютере. Введите параметры цепи и экспериментальные точки. По окончании работы программы на дисплее появится изображение теоретических АЧХ и ФЧХ цепи Вина вместе с экспериментальными точками.

3.4. Используя программу `win-circ.exe`, сравните теоретические АЧХ и ФЧХ цепи Вина при постоянной f_0 и следующих соотношениях R_1, R_2, C_1 и C_2 :

$$R_1/R_2 = 0, 1 \text{ и } 10, \quad C_1/C_2 = 0, 1 \text{ и } 10.$$

Объясните наблюдаемые изменения зависимостей АЧХ и ФЧХ.

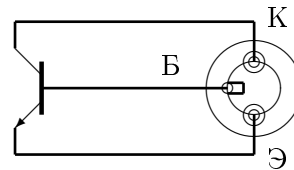
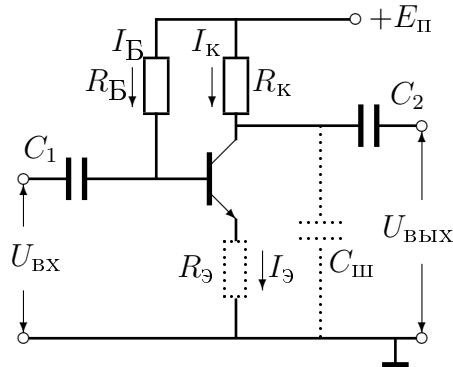
Лабораторная работа 2. Усилитель на биполярном транзисторе

Изучается однокаскадный усилитель напряжения низкой частоты на биполярном транзисторе по схеме с общим эмиттером.

Типовое задание: Максимальное выходное напряжение неискаженного сигнала $U_{\text{вых.макс}}$, входное $R_{\text{вх}}$ и выходное $R_{\text{вых}}$ сопротивления, (другие варианты задания: K_0 и $R_{\text{вх}}$ или K_0 и $R_{\text{вых}}$), границы диапазона частот усиления $f_{\text{Н}}$ и $f_{\text{В}}$ по уровню 3 дБ относительно коэффициента усиления K_0 на квазирезонансной частоте $f_0 = \sqrt{f_{\text{Н}}f_{\text{В}}}$.

1. Расчет усилителя

Схема усилителя приведена на рис. 2.1.



Расположение выводов транзистора

Рис. 2.1. Принципиальная схема УНЧ, (вариант для $n-p-n$ -транзистора)

Получите транзистор и сопроводительный листок со значениями коэффициента усиления по току $h_{21э} = \beta$ и выходной проводимости $h_{22б} = 1/r_{\text{к}}$, измеренными при $I_{\text{э}} = 1 \text{ мА}$ и 5 мА для данного транзистора.

Порядок расчета

1.1. Используя заданное значение неискаженного выходного сигнала, рассчитайте величину напряжения источника питания

$$E_{\text{П}} \geq 2\sqrt{2}U_{\text{эфф.вых.макс.}} + 1 \approx 2U_{\text{ампл.вых.макс.}} + 1.$$

1.2. Полагая $R_{\text{К}} \simeq R_{\text{ВЫХ}}$, рассчитайте ток коллектора в рабочей точке:

$$I_{\text{К}} = E_{\text{П}} / 2R_{\text{К}}.$$

Скорректируйте величины $h_{21э}$ и $h_{22б}$ для рассчитанного тока коллектора, используя графики на с. 65 "Пособия". (Ток базы $I_{\text{Б}}$ значительно меньше тока коллектора, поэтому можно принять $I_{\text{э}} \approx I_{\text{К}}.$) На графиках указаны относительные величины $h_{21э}$ при $I_{\text{э}} = 1 \text{ мА}$. Для определения $h_{21э}$, соответствующей

рабочему току в схеме, нужно умножить его значение при токе в 1 мА на поправочный коэффициент по графику.

1.3. Проверьте условие $I_K < I_{K_{\max}}$. Предельные значения параметров см. на с. 64 ("Уч. пособие").

1.4. Рассчитайте сопротивление в цепи базы $R_G = 2\beta R_K$.

1.5. По заданному $R_{ВХ}$ рассчитайте $R_Э$, используя формулу

$$R_{ВХ} = r_G + (\beta + 1)(r_Э + R_Э),$$

где $r_Э (\Omega) = 26(\text{мВ})/I_Э(\text{мА})$, $r_G = 220 \Omega$.

1.6. Проверьте справедливость предположения $R_{ВЫХ} \simeq R_K$, используя формулу $R_{ВЫХ} = \frac{R_K r_K^*}{R_K + r_K^*}$, $r_K^* \approx \frac{r_K}{\beta + 1}$, где $r_K = 1/h_{22б}$. Если разница превышает 20%, скорректируйте R_K в сторону увеличения.

1.7. По известным значениям β , $R_{ВХ}$ и $R_{ВЫХ}$ рассчитайте коэффициент усиления $K_0 = \beta \frac{R_{ВЫХ}}{R_{ВХ}}$.

1.8. По заданной величине f_H рассчитайте емкости конденсаторов C_1 и C_2 по формулам:

$$C_1 = 1/(2\pi f_H(R_G + R_{ВХ})), \quad C_2 \gg 1/(2\pi f_H(R_{ВЫХ} + R_{\text{нагр}})).$$

Для грубой оценки емкости C_{III} можно использовать формулу

$$2\pi f_B R_K C_{III} = 1.$$

Более точный расчет C приведен на с. 56 и 58 "Пособия".

2. Наладка схемы и методика измерений

2.1. Проверьте с помощью цифровых измерительных приборов номиналы полученных радиодеталей. Смонтируйте схему.

2.2. Подключите усилитель к источнику питания с учетом типа проводимости транзистора. С помощью вольтметра проверьте режим транзистора *по постоянному току*. Напряжение между коллектором и "землей" U_K должно быть приблизительно равно $E_{П}/2$. Если это условие не выполняется, измените R_G .

2.3. Подсоедините вход усилителя к выходу "600 Ω " генератора низкочастотных сигналов, (в генераторах типа ГЗ-118 сигналы, снимаемые с этого выхода, могут регулироваться как ступенчато, так и плавно; в генераторах ГЗ-117 можно использовать также выход "50 Ω "). Выход усилителя подключите к Y -входу осциллографа в режиме "закрытого" (\sim) входа. У всех подключенных приборов и схемы усилителя должна быть общая "земля".

Включите генератор и осциллограф. Установите частоту генератора $\sim f_0$. Развертка осциллографа непрерывная, синхронизация внутренняя. Установите выходное напряжение генератора таким, чтобы сигнал на экране осциллографа имел синусоидальную форму. Оцените коэффициент усиления K_0 на частоте f_0 .

2.4. Измерьте входное сопротивление усилителя $R_{\text{ВХ}}$ методом сравнения с дополнительным резистором: включите последовательно с генератором постоянный резистор с сопротивлением $R_{\text{доп}} \approx R_{\text{ВХ}}$ и измерьте напряжение в двух точках относительно "земли": до сопротивления $R_{\text{доп}}$, (т.е. U_{Γ}), и после него (т.е. $U_{\text{ВХ}}$). По этим измерениям определяют величину $R_{\text{ВХ}}$ по формуле:

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}} R_{\text{доп}}}{U_{\Gamma} - U_{\text{ВХ}}}.$$

Если измеренное $R_{\text{ВХ}}$ отличается от заданного более, чем на 20%, скорректируйте величину R_3 . После измерений отключите $R_{\text{доп}}$.

2.5. Снимите амплитудную характеристику, т.е. зависимость $U_{\text{ВЫХ}}$ от $U_{\text{ВХ}}$ при частоте f_0 . Определите максимальную величину неискаженного выходного сигнала.

2.6. Снимите АЧХ в заданном диапазоне частот при отсутствии нелинейных искажений выходного сигнала.

2.7. Сравните экспериментальную АЧХ с расчетной, используя программу unch.exe.

Лабораторная работа 3. Операционный усилитель

Изучается усилитель с заданной АЧХ на основе операционного усилителя с частотно-зависимой цепью ООС.

Типовое задание: вариант АЧХ, вид усилителя (инвертирующий, неинвертирующий), коэффициент усиления K_0 (определяется величинами R_1, R_2), границы диапазона частот по уровню 3 дБ

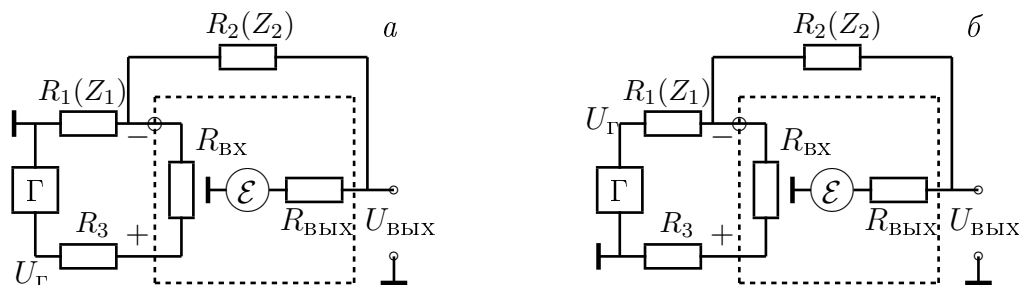


Рис.3.1. Эквивалентные схемы ОУ: *a* – неинвертирующего, *б* – инвертирующего

1. Измерение частоты единичного усиления

Знание частоты единичного усиления f_1 позволяет учесть влияние микросхемы на АЧХ усилителя. В практикуме величина f_1 измеряется косвенным

методом на падающем участке АЧХ, (где собственный коэффициент усиления ОУ значительно меньше величины K_0 на низких частотах), в режиме неинвертирующего усилителя.

1.1. Для измерения f_1 подпаяйте цепь ООС с параметрами

$$R_1 \simeq 600 \text{ Ом}, \quad R_2 = 0,5 \div 1 \text{ МОм}.$$

Свободный конец резистора R_1 заземлите. При такой цепи ООС спад АЧХ будет наблюдаться на частотах выше 1 – 2 кГц.

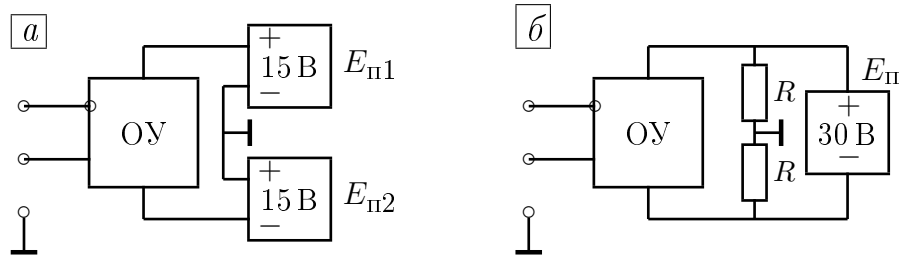


Рис. 3.2. Две схемы питания ОУ. Допускается использовать напряжение источников $\pm(3\dots 18)$ В (для *a*), $\pm(6\dots 36)$ В (для *б*).

1.2. Подключите плату к источнику постоянного напряжения. На рис. 3.2 приведены две схемы питания ОУ: от двух разнополярных источников с напряжением $E_{\text{п}}$ каждый, соединенных последовательно (*a*), и от одного источника с искусственно созданной средней точкой с помощью резистивного делителя напряжения (*б*). Рекомендуется использовать схему с одним источником, $E_{\text{п}} \simeq 20 - 25$ В.

1.3. Выход ОУ подключите к *открытому* Y -входу осциллографа.

1.4. Подключите выход "600 Ω " генератора низкой частоты к неинвертирующему входу ОУ. При таком включении выходное сопротивление генератора играет роль резистора R_3 .

1.5. При отсутствии входного сигнала (но подсоединенном генераторе !) проверьте балансировку ОУ. Переведите осциллограф в режим "закрытого" входа Y , заметьте положение луча на экране, а затем вновь переведите осциллограф в режим "открытого" входа Y . Если ОУ сбалансирован, луч останется на прежнем уровне. При нарушении балансировки на выходе ОУ появляется постоянная составляющая и луч смещается. Балансировка производится потенциометром $R_{\text{бал}}$ на плате. (Балансировку можно проверить и вольтметром.)

1.6. Включите генератор и измерьте коэффициент усиления $K(f)$ в трех-четырех точках диапазона частот $10 \div 100$ кГц. Величину входного сигнала на каждой частоте нужно выбирать такой, чтобы выходной сигнал не был искажен.

1.7. По полученным данным определите величину $f_1 = K(f)f$. Значения f_1 , измеренные в указанном диапазоне частот, должны получаться примерно одинаковыми. Среднее значение f_1 используется при расчете реальной АЧХ на компьютере.

2. Выбор схемы цепи ООС

По номеру варианта АЧХ выберите схему цепи ООС.

Сопротивление резистора R_1 для неинвертирующего усилителя выбирается равным выходному сопротивлению источника сигнала, а для инвертирующего – равным заданной величине входного сопротивления усилителя.

Сопротивление резистора R_2 определяется по формулам

$$\begin{aligned} R_2 &= (K_0 - 1)R_1 && \text{- для неинвертирующего усилителя,} \\ R_2 &= K_0 R_1 && \text{- для инвертирующего усилителя} \end{aligned}$$

Необходимо учитывать следующее:

- а) Величина R_2 должна быть больше 2 кОм – минимально допустимого сопротивления нагрузки для данной микросхемы;
- б) сопротивление дополнительного резистора R^* (в вариантах 1, 5, 7) выбирается на порядок больше, чем R_2 ;
- в) затем рассчитываются емкости конденсаторов в RC -цепочках по формуле

$$C_n = 1/(2\pi f_j R_m),$$

где f_j – заданная величина f_H или f_B , а индексы n и m относятся к соответствующим резисторам и конденсаторам схемы ООС. (Отметим, что при таком расчете АЧХ не учитываются параметры микросхемы.)

3. Наладка усилителя и измерение АЧХ

3.1. Измерьте фактические сопротивления резисторов и емкости конденсаторов на цифровых измерителях. Эти значения используются при расчетах АЧХ на компьютере.

Размещать детали на плате рекомендуется так, как они изображены на принципиальных схемах, (см. также рис. 3.3). Это облегчает проверку монтажа.

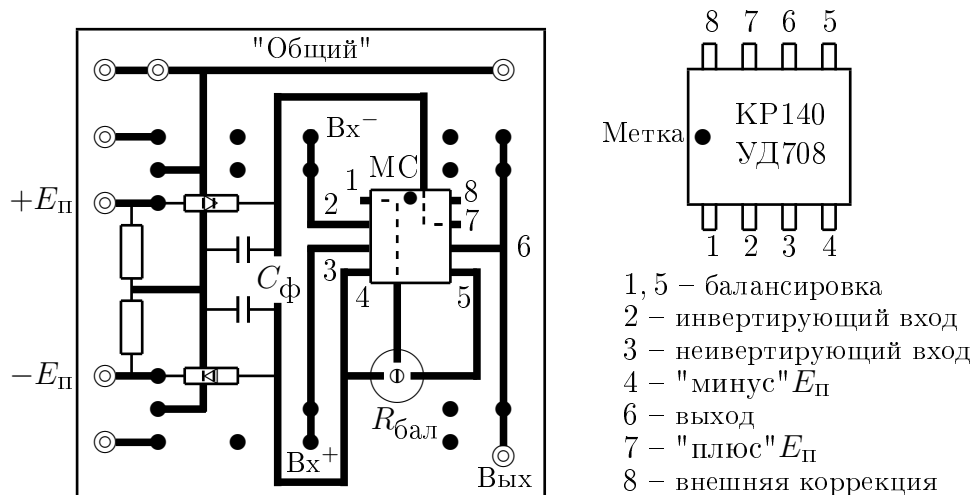


Рис. 3.3. Монтажная плата. Печатные проводники расположены на обратной стороне платы (жирные линии)

3.2. Подключите плату к источнику питания, генератору низкочастотных колебаний и осциллографу. При отсутствии входного сигнала еще раз проверьте балансировку ОУ и при необходимости отрегулируйте ее вновь. (В вариантах 2, 6, 8 балансировка нарушается при включении конденсатора последовательно с резистором R_1 из-за разрыва цепи по постоянному току.)

3.3. Включите генератор и проверьте коэффициент усиления и ход АЧХ в заданном диапазоне частот. Выходной сигнал не должен быть искажен во всем диапазоне частот.

3.4. Снимите АЧХ с помощью вольтметра или осциллографа. Измерения рекомендуется провести в 8–12 точках диапазона, "густота" точек выбирается в соответствии с видом АЧХ. (Для широкополосных усилителей принято строить график АЧХ в логарифмическом масштабе по частоте.)

4. Сравнение экспериментальных данных с теоретическими

Теоретические АЧХ ("идеальная" и "реальная") рассчитываются на компьютере по готовой программе **ou.exe**.

Для расчета необходимы следующие параметры:

- а) номер варианта АЧХ;
- б) вид усилителя (инвертирующий или неинвертирующий);
- в) паспортное значение *собственного* коэффициента усиления *микросхемы* $K(0) = 3 \cdot 10^4$ и измеренное значение f_1 ;
- г) фактические (измеренные) значения сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов цепи ООС;
- д) экспериментальные точки в форме $f = \dots$ (кГц), $K(f) = \dots$

На дисплей выводятся идеальная и реальная АЧХ, а также экспериментальные точки в логарифмическом масштабе по частоте и в линейном – по значениям коэффициента усиления.

Лабораторная работа 5. RC-генератор с цепью Вина

Изучается работа RC-генератора гармонических колебаний на основе операционно-го усилителя с положительной обратной связью в виде цепи Вина.

Типовое задание: частота генерации f_G .

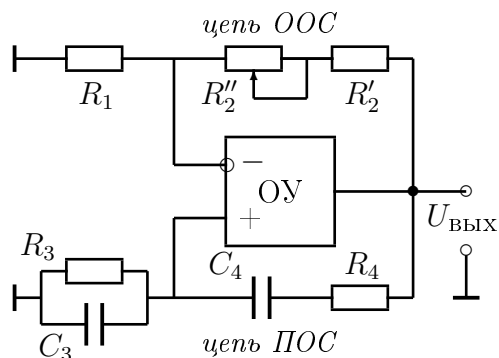


Рис. 5.1. Принципиальная схема RC-генератора на ОУ с цепью Вина.

Расчет начинают с выбора элементов цепи Вина. Резонансная частота f_0 и коэффициент передачи $K_{\text{пос}}(f_0)$ цепи Вина (см. рис. 5.1) определяются формулами

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}}, \quad K_{\text{пос}}(f_0) = \left(1 + \frac{R_4}{R_3} + \frac{C_3}{C_4}\right)^{-1}$$

Поскольку минимально допустимое сопротивление нагрузки микросхемы составляет 2 кОм, а ее входное сопротивление – около 400 кОм, должны быть выполнены неравенства

$$R_2, R_4 > 2 \text{ кОм}, \quad R_1, R_3 \ll 400 \text{ кОм}.$$

При невыполнении первого неравенства нарушается режим работы микросхемы, а при невыполнении второго сильно проявляется связь между инвертирующим и неинвертирующим входами ОУ через входные цепи микросхемы, что приводит к изменению частоты генерации по сравнению с расчетной.

Часто полагают $R_3 = R_4 = R$, $C_3 = C_4 = C$. При этом модуль коэффициента передачи $|K(j\omega_0)|$ равен 1/3. Такой выбор упрощает расчет и позволяет перестраивать генератор в диапазоне частот с помощью сдвоенного переменного резистора (R_3, R_4) или сдвоенного переменного конденсатора (C_3, C_4), не нарушая условий генерации.

Условие самовозбуждения $K_{\text{пос}} \cdot K_{\text{э}}^+ \geq 1$ в этом случае выполняется при величине коэффициента усиления неинвертирующего ОУ с цепью ООС

$$K_{\text{э}}^+ = 1 + (R_2' + R_2'')/R_1 > 3, \quad \dots \quad (R_2' + R_2'')/R_1 > 2.$$

Сопротивление постоянного резистора R_2' выбирается из условия $R_2'/R_1 < 2$, (ниже порога возбуждения). Сопротивление переменного резистора R_2'' выбирается таким, чтобы при его регулировке схема могла работать как в недовозбужденном режиме, так и в режиме генерации.

Порядок работы

- 1). По заданной f_0 рассчитайте параметры цепи Вина.
- 2). Соберите RC -генератор на плате ОУ.
- 3). Подключите к плате источник питания, а к выходу ОУ – осциллограф.
- 4). Отрегулируйте сопротивление переменного резистора R_2'' до получения колебаний, близких к гармоническим. Пронаблюдайте, как изменяется форма колебаний при увеличении коэффициента усиления ОУ.
- 5). Измерьте частоту колебаний. Оценка частоты проводится с помощью осциллографа путем измерения периода колебаний в режиме калиброванной по длительности внутренней развертки. Затем более точное определение частоты генерации проводится с помощью фигур Лиссажу. Для этого нужно перевести осциллограф в режим внешней развертки, на вход X подать сигнал от генератора низкочастотных колебаний, на вход Y – сигнал с выхода RC -генератора. Вблизи равенства частот обоих генераторов на экране осциллографа будет наблюдаться почти неподвижный эллипс. В этом случае частоту можно отсчитать непосредственно по шкалам звукового генератора.
- 6). Измерьте сквозные характеристики (АЧХ и ФЧХ) "цепь Вина + ОУ".

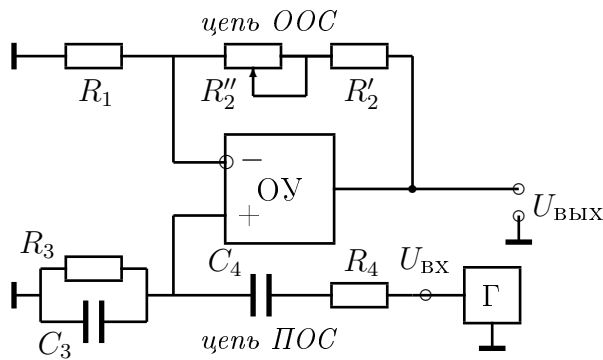


Рис.5.2. Схема измерения сквозных характеристик RC -генератора.

Для этого отключите цепь Вина от выхода микросхемы и подайте на вход цепи сигнал с внешнего генератора. Отношение сигнала на выходе микросхемы к сигналу генератора в этом случае определяет АЧХ и ФЧХ "сквозной" цепи (цепь Вина + микросхема). Отметим, что при $K_{\text{э}} = 3$ АЧХ самой микросхемы практически равномерна до частот порядка 200 – 300 кГц.

Напряжение питания микросхемы при этих измерениях должно быть включено!

- 7). Используя программу `rc_gen.exe`, сравните экспериментальные и расчетные АЧХ и ФЧХ, а также измеренное значение частоты генерации f с теоретическим значением квазирезонансной частоты f_0 цепи Вина.