

14. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ СИНУСОИДАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ НА ОУ

14.1. Краткое описание лабораторной работы

1. В лабораторной работе исследуются схемы генераторов синусоидального напряжения на ОУ TL082.
2. В качестве цепи, формирующей отрицательную обратную связь с неравномерной АЧХ, используется Т-образный режекторный (ослабляющий сигнал в определенной полосе частот) фильтр.
3. АЧХ Т-образного фильтра исследуется экспериментально и сравнивается с теоретической зависимостью.
4. В генераторах с частотно-зависимой цепью положительной обратной связи используются фильтр Вина и двухзвенный RC-фильтр.

14.2. Основные теоретические сведения

Если обратная связь в схеме операционного усилителя не подавляет входной сигнал, а напротив добавляет к нему часть выходного напряжения, то она называется положительной ОС (ПОС). В этом случае для приращения выходного сигнала $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ при воздействии $\Delta U_{\text{ВХ}}$ имеем:

$$(135) \quad \Delta U_{\text{ВЫХ}} = K_U(\Delta U_{\text{ВХ}} + \beta \cdot \Delta U_{\text{ВЫХ}})$$

где K_U — коэффициент усиления ОУ без ПОС; β — коэффициент обратной связи, указывающий какая часть выходного напряжения прикладывается ко входу. Из формулы (135) вытекает соотношение для коэффициента усиления схемы с ПОС:

$$(136) \quad K_{U \text{ ПОС}} = \frac{K_U}{1 - K_U \beta}$$

Если произведение $K_U \cdot \beta$ меньше единицы, то усилитель с ПОС продолжает оставаться линейным с коэффициентом усиления, превышающим K_U . Выходное напряжение такого усилителя не достигает уровня насыщения только для очень малых сигналов. Если же произведение $K_U \cdot \beta$ достигает единицы, то $K_{U \text{ ПОС}}$ устремляется к бесконечности. Для значений $K_U \cdot \beta > 1$ усилитель с ПОС перестает быть линейным, на его выходе возникает периодический сигнал.

Рассмотренный в лабораторной работе №12 мультивибратор на аналоговом компараторе, будучи построенным на ОУ, можно рассматривать и как схему с ПОС, работающую в нелинейном режиме. Однако, ОУ, в отличие от аналоговых компараторов, способны выдавать выходные напряжения, отличные от напряжений насыщения, и пригодны для построения схем генераторов, выходными сигналами которых являются периодические напряжения, отличные от прямоугольных импульсов.

Введем в цепь отрицательной обратной связи ОУ фильтр, который на некоторой угловой частоте $\omega = \omega_0$ обладает наименьшим коэффициентом передачи и нулевым фазовым сдвигом между входным и выходным напряжениями. Таким фильтром может быть Т-образный фильтр (Рис. 105).

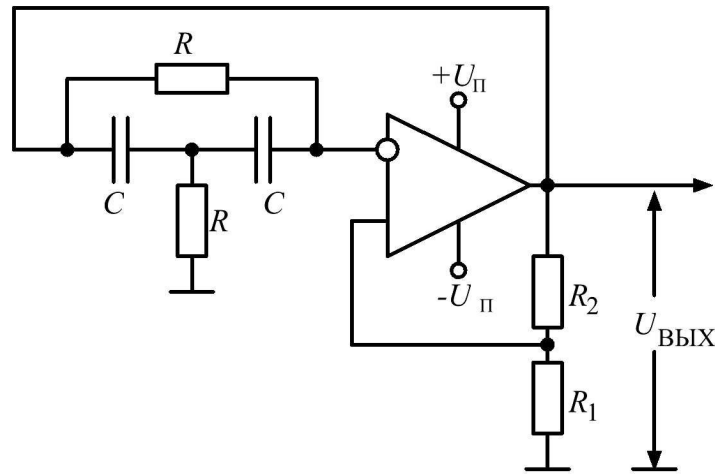


Рис. 105. Автогенератор с Т-образным фильтром

Для анализа этой цепи нужно знать выражение для передаточной функции Т-образного фильтра. Ее можно легко вывести, сделав небольшие преобразования схемы. По аналогии с рассуждениями, использованными в лабораторной работе №2, заменим конденсатор на его реактивное сопротивление $Z = -j \frac{1}{\omega C}$ и, для наглядности, изобразим схему Т-фильтра следующим образом:

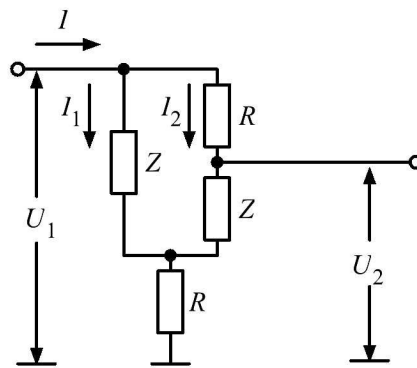


Рис. 106. К анализу Т-образного фильтра

Поскольку ток во вход ОУ не течет, его влияние на цепь Т-образного фильтра отсутствует, и весь фильтр можно проанализировать как цепь постоянного тока с входным напряжением U_1 и выходным U_2 , после чего перейти к анализу в комплексной области.

Ток I , отбираемый фильтром от источника напряжения (от выхода ОУ) $U_1 = U_{\text{ВЫХ}}$ (см. Рис. 105 и Рис. 106), по закону Ома для участка цепи равен:

$$(137) \quad I = \frac{U_1}{R+Z \parallel (R+Z)},$$

где « $\parallel$ » - обозначение для параллельного включения сопротивлений. Согласно формулам для параллельного включения резисторов, $Z \parallel (R+Z) = \frac{Z(R+Z)}{R+2Z}$, тогда формула (137) для тока может быть преобразована как

$$(138) \quad I = \frac{U_1}{R + \frac{Z(R+Z)}{R+2Z}} = \frac{U_1(R+2Z)}{R^2+Z^2+3RZ}.$$

Ток I делится на делителе тока, в ветвях которого протекают токи I_1 и I_2 (см. Рис. 106). Делитель тока встречается в современной схемотехнике реже делителя напряжения, поэтому уделим ему чуть больше внимания. Если входной ток I протекает через пару резисторов R_1 и R_2 , то напряжение, которое возникнет на этой паре резисторов, по закону Ома составит

$U = I_{\text{BX}} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$. Этот ток разделяется на два тока I_1 и I_2 . Ток через резистор R_2 составит $I_2 = \frac{U}{R_2} = I_{\text{BX}} \frac{R_1}{R_1 + R_2}$.

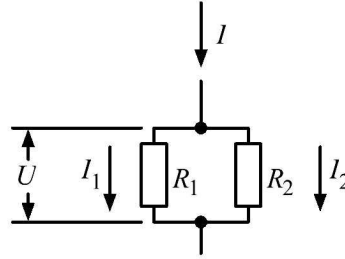


Рис. 107. Делитель тока на резисторах

Для схемы Рис. 106 полученная формула делителя тока с учетом (138) позволяет записать выражение для тока I_2 следующим образом:

$$(139) \quad I_2 = I \frac{Z}{R+2Z} = \frac{U_1(R+2Z)}{R^2+Z^2+3RZ} \cdot \frac{Z}{R+2Z} = U_1 \frac{Z}{R^2+Z^2+3RZ}.$$

Выходное напряжение Т-фильтра U_2 отличается от его входного напряжения U_1 на величину падения напряжения, которое вызывает ток I_2 , протекая через резистор R , соединенный с выходом фильтра. Тогда:

$$(140) \quad U_2 = U_1 - I_2 R = U_1 - U_1 \frac{RZ}{R^2+Z^2+3RZ}.$$

Передаточная функция Т-фильтра определяется отношением выходного напряжения U_2 к входному U_1 . Соответственно,

$$(141) \quad K = 1 - \frac{RZ}{R^2+Z^2+3RZ} = \frac{R^2+Z^2+2RZ}{R^2+Z^2+3RZ}.$$

Разделим числитель и знаменатель полученного выражения на Z^2 :

$$(142) \quad K = \frac{1+2\left(\frac{R}{Z}\right)+\left(\frac{R}{Z}\right)^2}{1+3\left(\frac{R}{Z}\right)+\left(\frac{R}{Z}\right)^2}.$$

Согласно введенному обозначению, $Z = -j \frac{1}{\omega C}$. Тогда $\frac{R}{Z} = j\omega RC$. Обозначим $\omega_0 = \frac{1}{RC}$. Соответственно, $\frac{R}{Z} = j \frac{\omega}{\omega_0}$, а квадрат этой величины равен $\left(\frac{R}{Z}\right)^2 = -\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2$. Подставим полученные выражения в (142):

$$(143) \quad K(j\omega) = \frac{1+2j\frac{\omega}{\omega_0}-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1+3j\frac{\omega}{\omega_0}-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}.$$

Используя соотношения (8) и (9), можно получить АЧХ и ФЧХ Т-образного фильтра. Для более удобных вычислений преобразуем (143), домножив числитель и знаменатель на комплексно сопряженное знаменателя, и введем обозначение $x = \frac{\omega}{\omega_0}$. После упрощений получим:

$$(144) \quad K(j\omega) = \frac{1+4x^2+x^4+j(x^3-x)}{1+7x^2+x^4}.$$

Соответственно, АЧХ и ФЧХ для Т-образного фильтра имеют вид:

$$(145) \quad K(\omega) = \frac{\sqrt{1+9x^2+16x^4+9x^6+x^8}}{1+7x^2+x^4}, \quad \varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{x^3-x}{1+4x^2+x^4}\right).$$

Диаграмма Бode для полученных АЧХ и ФЧХ показана на Рис. 108.

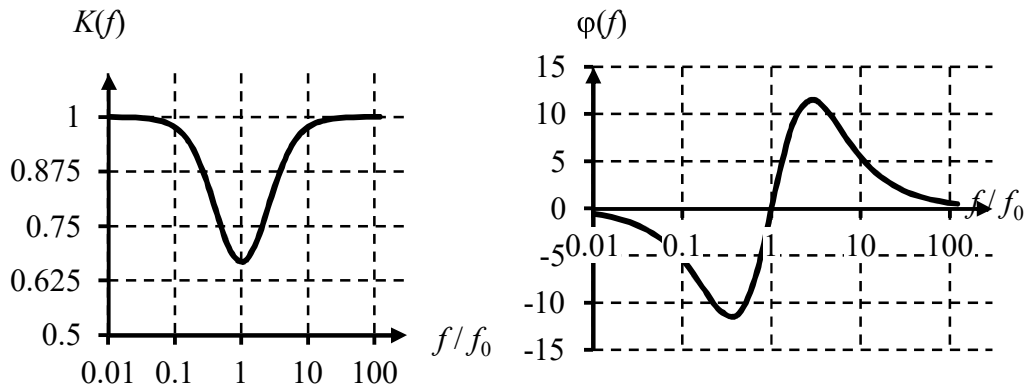


Рис. 108. Диаграмма Бode для Т-образного фильтра

Анализ АЧХ и ФЧХ показывает, что коэффициент передачи Т-образного фильтра близок к единице почти на всех частотах, кроме $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}$. Фильтр является **полосно-ослабляющим** (режекторным), т.е. ослабляет сигнал на определенной частоте. На этой частоте коэффициент передачи приобретает минимальное значение: $K = 2/3$, а фазовый сдвиг равен нулю. Отсюда, если цепь положительной обратной связи, образуемая делителем на резисторах R_1 и R_2 (см. Рис. 105), будет передавать с выхода ОУ на его неинвертирующий вход долю выходного напряжения, примерно равную $2/3 \cdot U_{\text{ВЫХ}}$, то **воздействие ПОС сравняется с уровнем ООС только на частоте f_0** . На этой частоте и возникает генерация, прочие частоты подавляются, в итоге на выходе схемы получается синусоидальный сигнал.

Можно ввести фильтр и в цепь положительной обратной связи. Таким фильтром может быть как мост Вина, так и двухзвенный **полосно-пропускающий** RC-фильтр (Рис. 109). Как было показано в описании лабораторной работы №2, коэффициент передачи этих фильтров описывается соотношением (33), которое при $\omega = \omega_0$ обращается в $1/3$:

$$K(\omega) = \frac{\sqrt{9 + \left(\frac{\omega_0 - \omega}{\omega}\right)^2}}{\frac{\omega_0^2 + \omega^2}{\omega_0^2} + 7} [\omega = \omega_0] = \frac{1}{3}.$$

Фазовый сдвиг, согласно (32), при $\omega = \omega_0$ обращается в ноль:

$$(146) \quad \varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{\frac{\omega_0 - \omega}{\omega}}{3}\right) [\omega = \omega_0] = 0.$$

На остальных частотах фильтр ослабляет входной сигнал, т.е. фильтр является **полосно-пропускающим** (ослабляет сигнал на всех частотах, кроме f_0). Аналогично, при правильном выборе R_1 и R_2 **воздействие ПОС превосходит воздействие ООС только на частоте f_0** , и на выходе схемы возникает синусоидальный сигнал данной частоты. На остальных частотах глубина ООС выше глубины ПОС, и генерации не возникает.

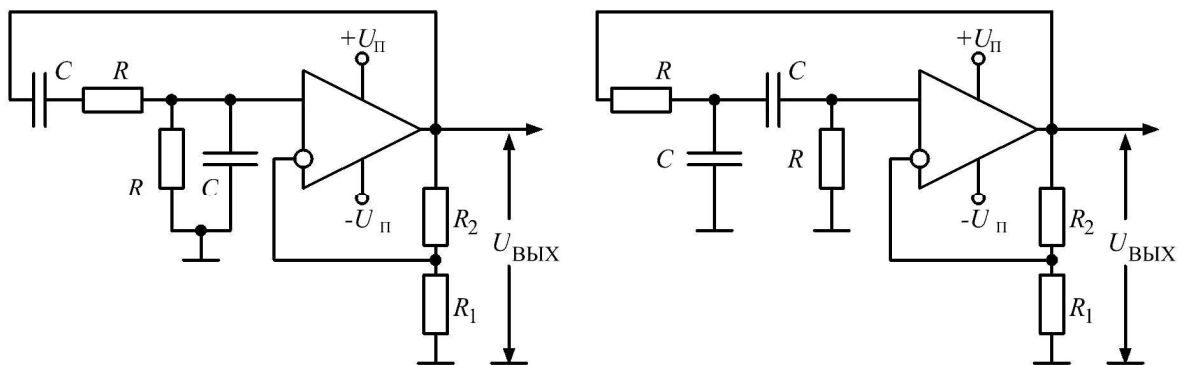


Рис. 109. Автогенератор с мостом Вина (а) и двухзвенным RC-фильтром (б)

14.3. Задание на проведение исследований

1. Соберите схему Т-образного полосно-ослабляющего фильтра согласно Рис. 110 и измерьте его АЧХ при помощи двух каналов осциллографа, подавая сигнал U_1 с генератора (амплитуда – 2-3 В, форма сигнала – синусоидальная, диапазон частот – от $0.1 \cdot f_0$ до $10 \cdot f_0$). ФЧХ измерять не нужно.

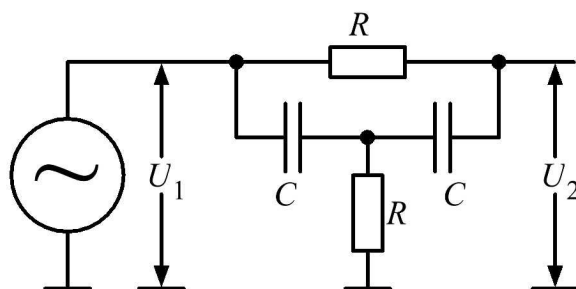


Рис. 110. Полосно-ослабляющий Т-образный фильтр

Номиналы конденсаторов C и резисторов R выберите по Таблица 17, теоретическое значение выходной частоты рассчитайте по формуле $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$.

Таблица 17. Задание на проведение работы

№ бригады	R , кОм	C , мкФ	f_0 , Гц	Схема для п.7
1	1	1		Фильтр Вина
2	2.2	0.1		Фильтр Вина
3	4.7	0.1		Фильтр Вина
4	10	0.01		Фильтр Вина
5	15	0.01		Фильтр Вина
6	1	1		2-зв. RC
7	2.2	0.1		2-зв. RC
8	4.7	0.1		2-зв. RC
9	10	0.01		2-зв. RC
10	15	0.01		2-зв. RC

Способ измерения АЧХ описан в главе 2.3, посвященной лабораторной работе №2, «Исследование пассивных RC-фильтров». Значения для АЧХ можно измерять как при помощи курсоров, так и при помощи функции измерения двойного размаха напряжения канала.

2. Постройте экспериментальные и теоретические АЧХ для Т-образного фильтра на графике с логарифмической осью частоты и дайте заключение о соответствии или расхождении практических результатов и теоретических соображений.

3. Соберите схему автогенератора с исследованным Т-образным полосно-ослабляющим фильтром (см. Рис. 111). В случае недостатка постоянных резисторов на 4.7 кОм, используйте в качестве R_2 полное сопротивление переменного резистора на 4.7 кОм.

4. Подайте питание (+/- 10 В) на стенд и подключите осциллограф к выходу схемы. Регулируя сопротивление переменного резистора R_1 , добейтесь возникновения генерации выходного сигнала неискаженной синусоидальной формы. Измерьте частоту генерации при помощи осциллографа и сравните её со значением, рассчитанным теоретически.

5. Запишите в файл или сфотографируйте осциллограмму выходного сигнала.

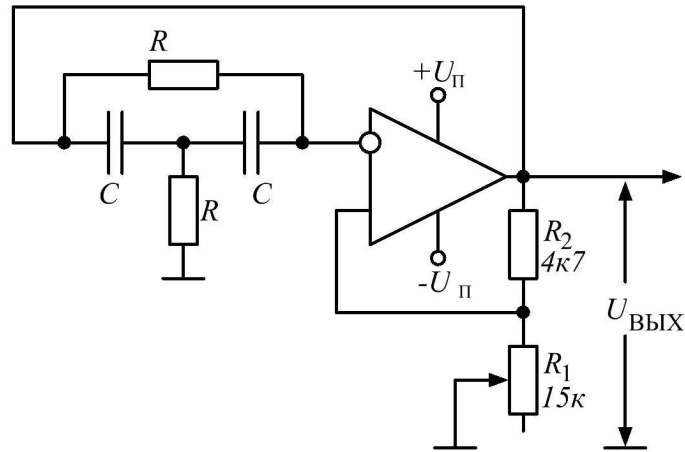


Рис. 111. Автогенератор с Т-образным фильтром для проведения исследований

6. Отключите питание схемы, отсоедините от схемы переменный резистор R_1 и измерьте получившееся сопротивление между его использованными выводами. Рассчитайте по формуле $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$ коэффициент положительной обратной связи (ПОС) операционного усилителя и сравните его с теоретическим значением $2/3$ (условие начала генерации для автогенератора с Т-образным фильтром).

7. Соберите схему автогенератора с одним из полосно-пропускающих фильтров.

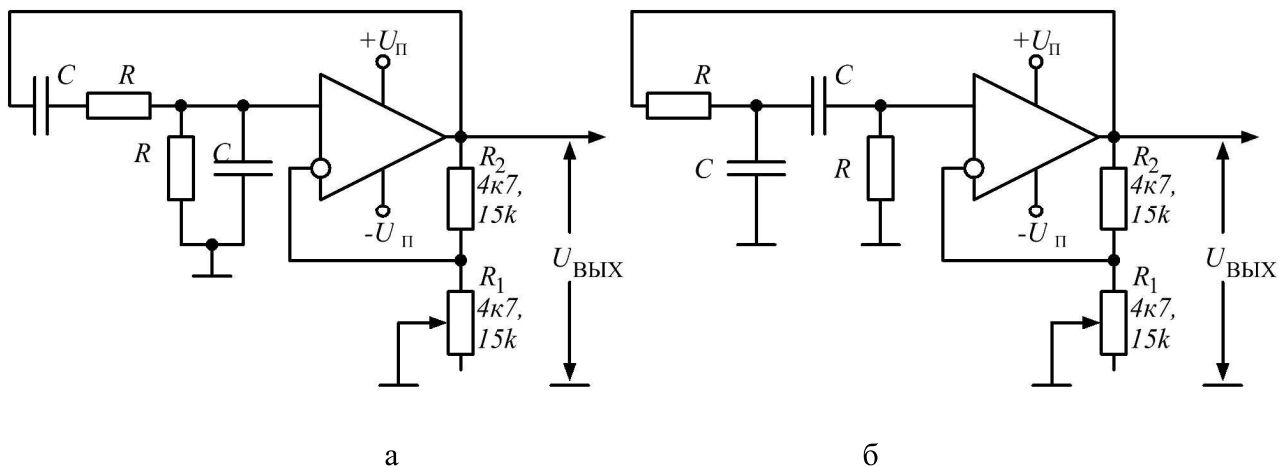


Рис. 112. Автогенераторы с фильтром Вина (а) и двухзвенным RC-фильтром (б) для проведения исследований

Индивидуальные номиналы резисторов и конденсаторов фильтра, а также его тип содержит Таблица 17.

Для цепи ООС используйте резисторы R_1 и R_2 таких номиналов, какие остались в наличии после сборки фильтра (либо оба резистора 4.7 кОм, либо оба – 15 кОм).

8. Повторите действия согласно пп. 4-6 настоящих методических указаний. При сравнении теоретического коэффициента передачи цепи R_1 - R_2 , обеспечивающего устойчивую работу автогенератора, с практически измеренным значением, учтите отличия схем Рис. 112 от схемы Рис. 111.

В частности, резисторы в данных схемах задают коэффициент передачи отрицательной обратной связи (ООС), а не ПОС. Коэффициент передачи обоих полосно-пропускающих фильтров (т.е. коэффициент передачи цепи ПОС) на центральной частоте f_0 составляет не $2/3$, как для Т-образного фильтра, а $1/3$. Соответственно, условием устойчивой генерации сигнала является равенство $\beta = R_1 / (R_1 + R_2) = 1/3$.