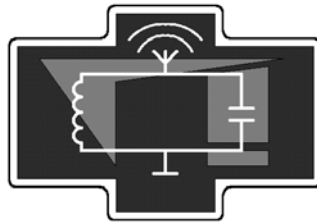


Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова
Физический факультет

Ю.И. Кузнецов, В.И. Балакший

***RC* - ГЕНЕРАТОРЫ**

Методическая разработка к задаче "Практикума колебаний"
кафедры физики колебаний



Москва, 2008 г.

УДК 534:621

Печатается по решению кафедры физики колебаний
физического факультета МГУ

Кузнецов Ю.И., Балакший В.И.

RC - генераторы. Методическая разработка к одноименной задаче "Практикума колебаний" кафедры физики колебаний. – М., изд. физического факультета МГУ, 2008, 27 с.

Методическая разработка предназначена для студентов 3-5 курсов отделения радиофизики физического факультета МГУ, выполняющих задачи в "Практикуме колебаний". В разработке изложены физические принципы работы *RC*-генераторов гармонических колебаний. Описаны экспериментальная установка и методика измерений при выполнении упражнений.

Объем 1,5 п.л.

Тираж 20 экз.

Заказ № 45

Отпечатано в отделе оперативной печати физического факультета МГУ

им. М.В.Ломоносова

Целью данной задачи является изучение принципов работы *RC*-генераторов почти гармонических колебаний.

1. Введение

RC-генераторы относятся к классу автоколебательных систем *релаксационного типа*. Основными элементами такого генератора являются усилитель и апериодические звенья, составленные из резисторов и конденсаторов. Не имея в своем составе колебательного контура, такие генераторы, тем не менее, позволяют получать колебания, близкие по форме к гармоническим. Однако при сильной регенерации системы, когда используются существенно нелинейные области характеристики усилителя, форма колебаний, ввиду отсутствия колебательного контура, сильно искажается. Поэтому генератор должен работать при незначительном превышении порога самовозбуждения.

Основными достоинствами генераторов *RC*-типа являются простота и малые габариты. Эти преимущества особенно ярко проявляются при генерировании низких частот. Для генерирования частот порядка 100 Гц в *LC*-генераторах (генераторах Томсона) потребовались бы весьма большие значения индуктивностей и емкостей.

В данной задаче изучаются *RC*-генераторы на основе *операционных усилителей (ОУ)*.

2. Общие сведения о генераторах электрических колебаний

Генераторы незатухающих электрических колебаний представляют собой устройства, преобразующие энергию постоянного тока источника питания в энергию электрических колебаний.

В любой реальной электрической цепи всегда существуют потери электромагнитной энергии и в силу этого невозможны незатухающие электрические колебания. Поэтому любой генератор обязательно содержит *активный элемент*, который компенсирует потери энергии колебаний за счет энергии внешнего источника. В качестве активных элементов используют самые разнообразные электронные, газоразрядные и твердотельные приборы и среды. Примерами таких активных элементов могут служить электронные лампы, биполярные и полевые транзисторы, усилители на основе интегральных микросхем и др.

Другим необходимым элементом генератора является цепь положительной обратной связи, которая обеспечивает поступление энергии в колебательную систему или другой накопитель энергии. *Обратной связью* называют передачу части энергии сигнала с выхода активной системы на ее вход.

Для ограничения и стабилизации амплитуды колебаний в генераторе используются *нелинейные элементы*. Это могут быть как специально вводимые, так и используемые в генераторе активные элементы, обладающие, как правило, нелинейными характеристиками.

Для нахождения некоторых общих условий существования незатухающих колебаний рассмотрим пример, когда генератор представляет собой нелинейный усилитель, охваченный с выхода на вход цепью обратной связи, как показано на рис. 1. Разомкнем цепь обратной связи в точках $a-b$. Пусть на входе усилителя $1a-1b$ действует гармонический сигнал $U_{вх}$. Если на выходе цепи обратной связи $3a-3b$ для некоторой частоты ω_0 получим сигнал $U_{ос}$, равный по амплитуде и фазе (с точностью до $2\pi n$, где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) входному сигналу:

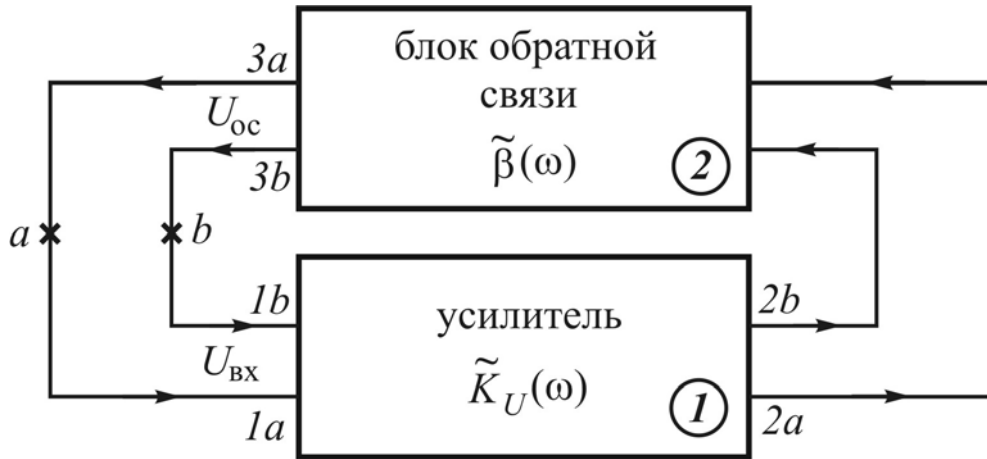


Рис. 1. Блок-схема генератора электрических колебаний

$$U_{oc} = U_{вх}, \quad (1)$$

то при замыкании цепи обратной связи в системе могут возникнуть и существовать незатухающие колебания с частотой ω_0 . Рассмотренный вариант обратной связи соответствует так называемой *положительной* обратной связи.

В общем случае коэффициенты передачи усилителя \tilde{K}_U и цепи обратной связи $\tilde{\beta}$ являются комплексными величинами и зависят от частоты: $\tilde{K}_U = \tilde{K}_U(\omega)$, $\tilde{\beta} = \tilde{\beta}(\omega)$. Условие (1) в этом случае запишется в виде:

$$U_{oc} = U_{вх} \tilde{K}_U(\omega_0) \tilde{\beta}(\omega_0) = U_{вх} \quad (2)$$

или

$$\tilde{K}_U(\omega_0) \tilde{\beta}(\omega_0) = 1 \quad (3)$$

Условие (3) эквивалентно следующим двум:

$$|\tilde{K}_U(\omega_0) \tilde{\beta}(\omega_0)| \equiv K_U(\omega_0) \beta(\omega_0) = 1, \quad (4)$$

$$\varphi = \arg[\tilde{K}_U(\omega_0) \tilde{\beta}(\omega_0)] = \varphi_1 + \varphi_2 = 2\pi n, \quad (5)$$

где φ_1 и φ_2 – сдвиги фаз сигналов на выходах соответственно усилителя и цепи обратной связи относительно фазы гармонического сигнала частоты ω_0 , действующего на их входах.

Условия (4) и (5) можно интерпретировать как одновременное

выполнение на некоторой частоте ω_0 двух условий – *баланса амплитуд* (4) и *баланса фаз* (5). Из этих условий можно найти значения параметров схемы генератора, при которых возбуждаются колебания, и частоту ω_0 этих колебаний.

При $K_U(\omega_0)\beta(\omega_0) > 1$ в генераторе возникнут нарастающие колебания частоты ω_0 , рост которых будет ограничиваться нелинейностью характеристик элементов, входящих в генератор.

В качестве активного элемента генераторов низкой частоты широкое применение получили интегральные операционные усилители (ОУ), обладающие малыми размерами, массой, энергопотреблением и высокой надежностью.

3. Усилители на основе ОУ

3.1. Общие сведения об ОУ

Интегральный ОУ представляет собой дифференциальный усилитель с очень большим коэффициентом усиления по напряжению ($K^* = 10^4 \div 10^6$ и более), входным сопротивлением $R_{вх}^* \rightarrow \infty$ и малым выходным сопротивлением $R_{вых}^*$. ОУ выполняются по схемам с непосредственными связями между каскадами и обычно усиливают сигналы в частотном диапазоне от нуля до единиц мегагерц. Наличие дифференциального входа означает, что имеется два входа и выходной сигнал усилителя пропорционален *разности* сигналов, поступающих на его входы. Один из входов называется *неинвертирующим* (выходной сигнал совпадает по фазе с сигналом, подаваемым на этот вход при заземленном другом входе), а другой – *инвертирующим* (выходной сигнал в противофазе с сигналом на этом входе при заземленном неинвертирующем входе). ОУ не используются без обратной связи, а наличие дифференциального входа дает возможность при создании устройств на основе ОУ применять как отрицательную, так и положительную обратную связь.

Одним из важных применений ОУ является построение на их основе усилителей электрических сигналов. Использование в этих случаях

отрицательной обратной связи позволяет получить усилители, параметры которых определяются в основном параметрами используемой цепи отрицательной обратной связи.

3.2. Обратные связи в усилителях

Рассмотрим простейший случай: усилитель 1 с коэффициентом усиления \tilde{K}_0 охвачен цепью обратной связи 2 с коэффициентом передачи $\tilde{\beta}$, как показано на рис. 2. Здесь $U_{\text{вх}}$ – входной сигнал, $U_{\text{вых}}$ – выходной сигнал, $U_{\text{ос}}$ – сигнал обратной связи, Σ – узел суммирования сигналов, U_{Σ} – сигнал на входе усилителя. Величины \tilde{K}_0 и $\tilde{\beta}$ считаем комплексными; при этом их модули $K_0 \equiv |\tilde{K}_0|$ и $\beta \equiv |\tilde{\beta}|$ описывают изменение амплитуды сигналов, а аргументы $\varphi_1 \equiv \arg(\tilde{K}_0)$ и $\varphi_2 \equiv \arg(\tilde{\beta})$ – фазовый сдвиг сигналов на входе и выходе соответствующих блоков.

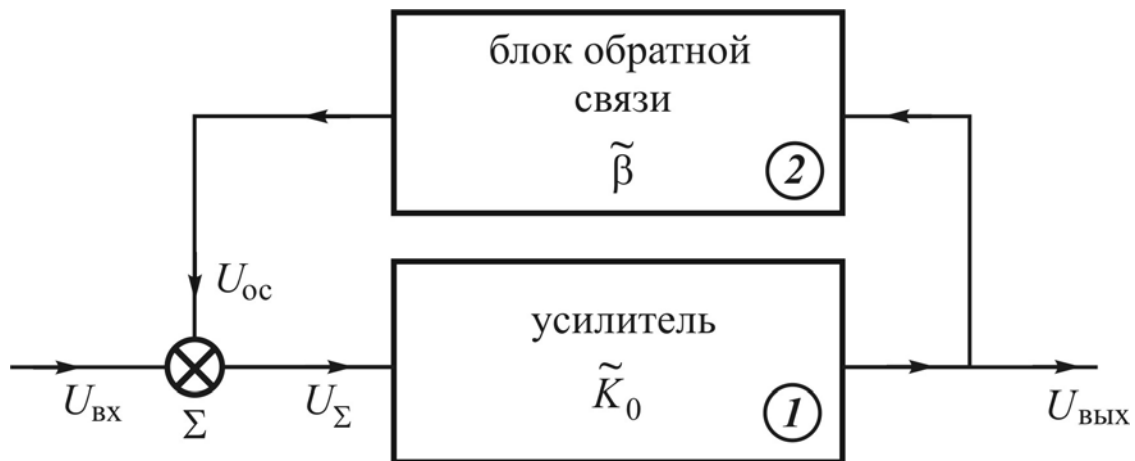


Рис. 2. Блок-схема усилителя с обратной связью

Если сигнал обратной связи $U_{\text{ос}}$, складываясь с входным сигналом $U_{\text{вх}}$, уменьшает сигнал U_{Σ} , то такая обратная связь называется *отрицательной*, если же, наоборот, увеличивает, – то *положительной*. В усилителях применяются, как правило, отрицательные обратные связи. Положительные обратные связи

являются необходимым элементом генераторов любых видов.

Для гармонических сигналов реализация отрицательной или положительной обратной связи зависит от разности фаз φ между входным сигналом $U_{\text{вх}}$ и сигналом обратной связи $U_{\text{ос}}$. В случае синфазности этих сигналов они складываются в узле суммирования и обратная связь является положительной. В случае их противофазности сигнал обратной связи вычитается из входного и обратная связь является отрицательной. Более общим различием между положительной и отрицательной обратной связью для гармонических сигналов являются следующие условия: при $0 \leq |\varphi| < \pi/2$ – связь положительная, а при $\pi/2 < |\varphi| \leq \pi$ – связь отрицательная. Естественно, что для гармонических сигналов эти условия должны выполняться с точностью до слагаемых $2\pi n$, где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

Отметим следующее обстоятельство. Так как сдвиг фаз, вносимый собственно усилителем и цепью обратной связи, в общем случае зависит от частоты, то возможны ситуации, когда для одной и той же системы в одном частотном интервале обратная связь может быть отрицательной, в другом интервале – положительной.

Найдем коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью. Пусть $|\varphi| \approx \pi$. Для усилителя, изображенного на рис. 2, в этом случае можно записать следующие очевидные соотношения:

$$U_{\Sigma} = U_{\text{вх}} - U_{\text{ос}}, \quad U_{\text{вых}} = K_0 U_{\Sigma}, \quad U_{\text{ос}} = \beta U_{\text{вых}}, \quad (6)$$

из которых следует, что коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью равен

$$K_{\beta} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{K_0}{1 + \beta K_0} \quad (7)$$

Полученное выражение показывает, что отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент передачи усилителя, стабилизируя его. При $\beta K_0 \gg 1$, что характерно для усилителей, построенных на основе интегральных ОУ, из (7) следует, что

$$K_{\beta} \approx 1/\beta. \quad (8)$$

Таким образом, коэффициент усиления практически не зависит от свойств активного элемента, охваченного обратной связью, а определяется параметрами цепи обратной связи. Случай $\beta K_0 \gg 1$ соответствует так называемой *глубокой* обратной связи.

В случае положительной обратной связи ($|\varphi| \approx 0$)

$$K_{\beta} = \frac{K_0}{1 - \beta K_0}. \quad (9)$$

Если величины K_0 и β таковы, что $\beta K_0 \rightarrow 1$, то $K_{\beta} \rightarrow \infty$. Это означает, что усилитель в рассматриваемом случае теряет устойчивость, т.е. переходит из режима устойчивого усиления в режим генерации.

При построении усилителей на основе ОУ возможны два варианта таких усилителей: *инвертирующие* и *неинвертирующие*. В первом случае источник сигнала подключается к инвертирующему входу ОУ и сигнал на выходе усилителя противофазен входному, а во втором случае – к неинвертирующему входу и выходной сигнал синфазен входному.

3.3. Инвертирующий усилитель на основе ОУ

Схема инвертирующего усилителя на базе ОУ показана на рис. 3. Здесь знаком «+» обозначен неинвертирующий вход ОУ, а знаком «-» – инвертирующий. На схеме не показано подключение к ОУ источников питания.

Будем считать, что коэффициент усиления ОУ без обратной связи $K^* \rightarrow \infty$, входные токи малы по сравнению с токами цепи обратной связи (это следует из того, что $R_{вх}^* \rightarrow \infty$), а $R_{вых}^*$ мало по сравнению с сопротивлениями R_1 и R_2 . В этом случае разность потенциалов между входами $U = U_{вых} / K^*$ исчезающе мала и потенциал инвертирующего входа с достаточной точностью можно считать равным нулю. Токи, текущие через резисторы R_1 и R_2 практически равны: $I_1 \approx I_2 = I$. При этих предположениях (которые

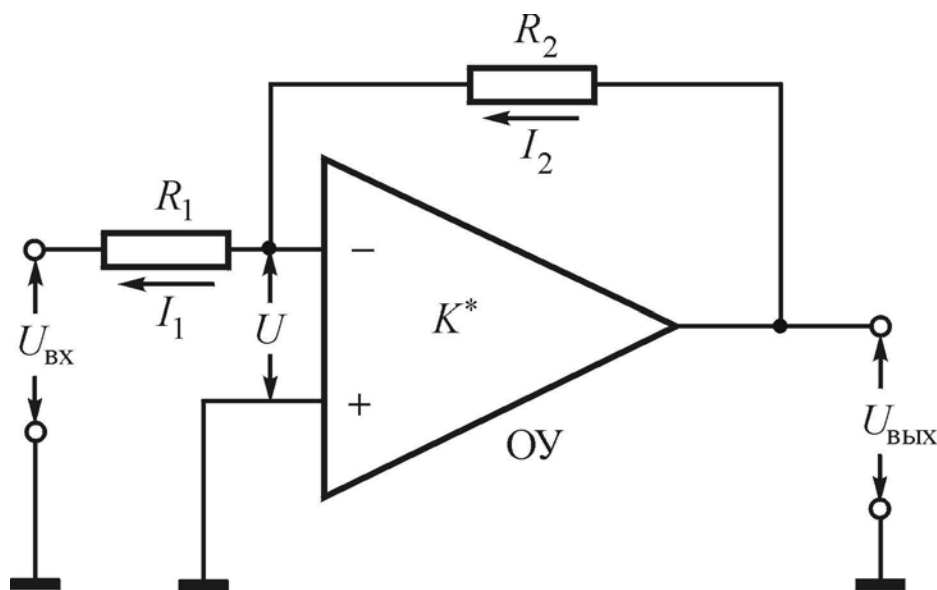


Рис. 3. Схема инвертирующего усилителя

выполняются на практике достаточно хорошо) имеем:

$$U_{\text{ВЫХ}} = IR_2, \quad U_{\text{ВХ}} = -IR_1. \quad (10)$$

Отсюда находим коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (11)$$

где знак « \rightarrow » означает, что сигналы на входе и выходе усилителя противофазны. Полученный результат находится в полном соответствии с выводами п. 3.2: коэффициент усиления инвертирующего усилителя определяется только отношением сопротивлений R_2/R_1 цепи отрицательной обратной связи и не зависит от параметров ОУ. Необходимо только, чтобы выполнялись указанные выше условия, касающиеся ОУ.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя $R_{\text{ВХ}}$ практически равно сопротивлению R_1 , так как инвертирующий вход находится под нулевым потенциалом.

3.4. Неинвертирующий усилитель на основе ОУ

Схема неинвертирующего усилителя на основе ОУ показана на рис. 4.

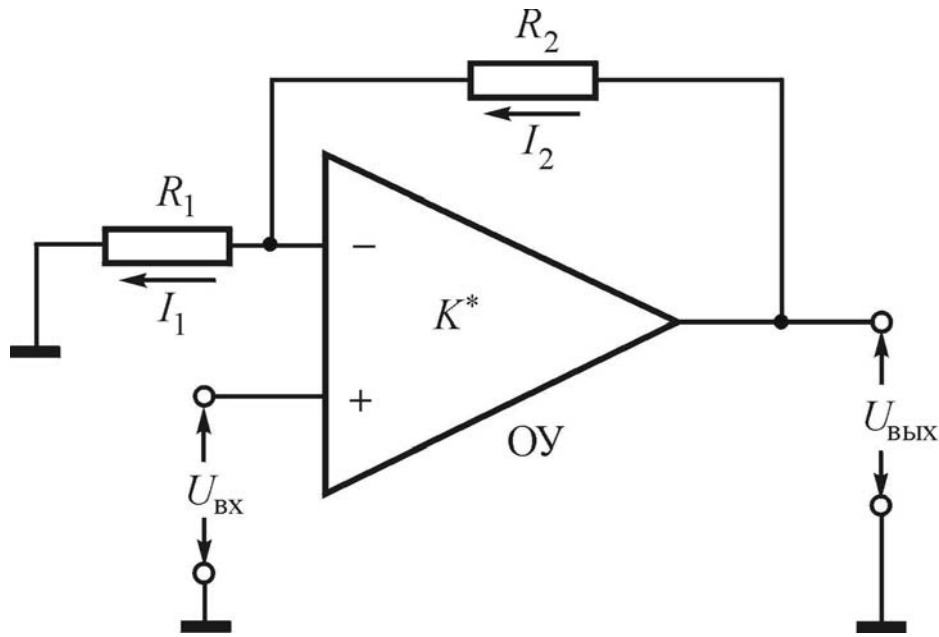


Рис. 4. Схема неинвертирующего усилителя

Используя те же предположения, что и для инвертирующего усилителя, можно записать:

$$U_{\text{ВЫХ}} = I(R_1 + R_2), \quad U_{\text{ВХ}} = IR_1, \quad (12)$$

откуда получается следующее выражение для коэффициента усиления по напряжению для неинвертирующего усилителя:

$$K_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (13)$$

Формулу (13) можно получить сразу из (8), если учесть, что цепочка R_2R_1 образует делитель выходного напряжения с коэффициентом передачи $\beta = R_1/(R_1 + R_2)$.

Так как входной ток ОУ исчезающе мал, то входное сопротивление в данном случае $R_{\text{ВХ}} \rightarrow \infty$.

Выходное сопротивление ОУ $R_{\text{ВЫХ}}^*$ обычно имеет величину от нескольких десятков до нескольких сотен Ом. Однако выходное сопротивление инвертирующего и неинвертирующего усилителей $R_{\text{ВЫХ}}$ имеет гораздо меньшую

величину за счет действия отрицательной обратной связи:

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx \frac{R_{\text{ВЫХ}}^*}{1 + K^* \beta} \quad (14)$$

При больших значениях $K^* \beta$ величина $R_{\text{ВЫХ}}$ может достигать долей ома.

В данной задаче изучаются принципы работы RC -генераторов двух видов: на основе неинвертирующего усилителя с цепью Вина в качестве цепи обратной связи, а также на основе инвертирующего усилителя с обратной связью через четырехзвенную фазовращающую цепочку. Исследуются амплитудные и фазовые условия самовозбуждения таких генераторов.

4. Теория RC -генераторов

4.1. RC -генератор с трехзвенной фазовращающей цепочкой

Принципиальная схема RC -генератора с трехзвенной фазовращающей цепочкой представлена на рис 5,а. Основными элементами генератора являются: операционный усилитель в инвертирующем включении 1, в рабочем диапазоне частот которого входное и выходное напряжения изменяются в противофазе (разность фаз равна π), и блок обратной связи 2 в виде трехзвенной цепочки RC . Для упрощения анализа емкости и сопротивления в цепочке взяты одинаковыми.

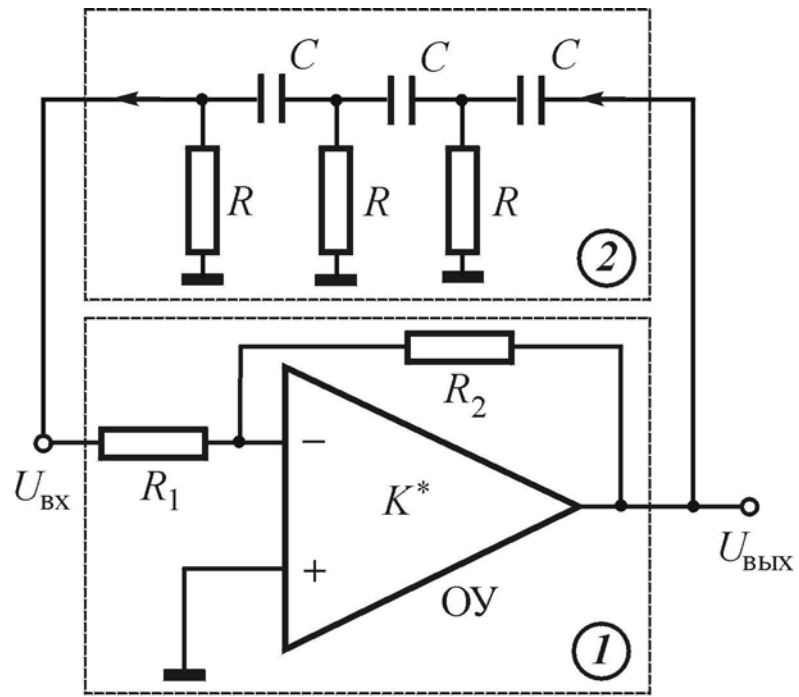
Такой генератор можно изобразить в виде блок-схемы, показанной на рис.5,б. Если в системе существуют стационарные гармонические колебания с частотой ω_0 , то на этой частоте должны выполняться условие баланса амплитуд

$$|\tilde{K}_U| \cdot |\tilde{\beta}| \equiv K_U \cdot \beta = 1 \quad (15)$$

и условие баланса фаз

$$\arg(\tilde{K}_U) + \arg(\tilde{\beta}) \equiv \varphi_1 + \varphi_2 = 2\pi n. \quad (16)$$

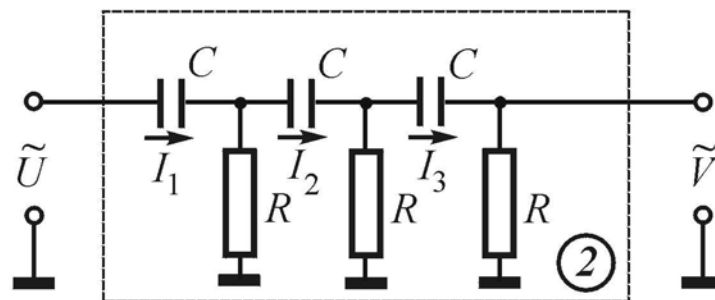
Баланс амплитуд означает, что потери энергии в цепи обратной связи за каждый период колебаний восполняются за счет усиления колебаний в усилителе. Баланс фаз означает, что полный сдвиг фаз при прохождении сигнала через усилитель и цепь обратной связи равен нулю или числу, кратному 2π . Для того, чтобы



(a)



(б)



(в)

Рис. 5. Генератор с трехзвенной RC-цепочкой

колебания в системе были чисто гармоническими, необходимо, чтобы условия баланса фаз и амплитуд выполнялись только для одной частоты $\omega = \omega_0$.

Если для сколь угодно малых колебаний выполняется условие самовозбуждения $K_U \cdot \beta > 1$, означающее превышение вложения энергии над потерями, то при включении генератора в нем возникнут нарастающие колебания (режим *мягкого возбуждения*). Этот процесс раскачки колебаний будет продолжаться до тех пор, пока из-за нелинейности характеристик элементов, входящих в генератор, не возникнет ограничение роста амплитуды и система не выйдет на стационарный режим генерации. Как правило, ограничение амплитуды происходит за счет нелинейности амплитудной характеристики усилителя $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$.

Для определения частоты генерации ω_0 RC -генератора найдем коэффициент передачи трехзвенной RC -цепочки, изображенной отдельно на рис. 5,в. Уравнения Кирхгофа для цепочки имеют вид:

$$\begin{cases} \tilde{U} = \frac{1}{j\omega C} \tilde{I}_1 + R(\tilde{I}_1 - \tilde{I}_2) \\ -R(\tilde{I}_1 - \tilde{I}_2) + \frac{1}{j\omega C} \tilde{I}_2 + R(\tilde{I}_2 - \tilde{I}_3) = 0 \\ -R(\tilde{I}_2 - \tilde{I}_3) + \frac{1}{j\omega C} \tilde{I}_3 + R\tilde{I}_3 = 0 \\ \tilde{V} = R\tilde{I}_3 \end{cases} \quad (17)$$

Решение системы (17) дает для коэффициента передачи выражение

$$\tilde{\beta} = \frac{\tilde{V}}{\tilde{U}} = \left[1 - \frac{5}{\omega^2 R^2 C^2} + j \frac{1}{\omega RC} \left(\frac{1}{\omega^2 R^2 C^2} - 6 \right) \right]^{-1}. \quad (18)$$

Отсюда следует, что на частоте

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}} \cdot \frac{1}{RC} \quad (19)$$

коэффициент передачи является действительным числом, равным

$$\beta(f_0) = -\frac{1}{29}. \quad (20)$$

Знак « \rightarrow » в этом выражении указывает на то, что цепочка сдвигает фазу сигнала

на $\varphi_2 = \pi$. Необходимый для выполнения условия баланса фаз дополнительный фазовый сдвиг напряжения на $\varphi_1 = \pi$ обеспечивается операционным усилителем в инвертирующем включении (об этом говорит знак « \leftarrow » в формуле (11)). Для выполнения условия баланса амплитуд надо, чтобы коэффициент усиления усилителя $|K_U|$ был не менее 29.

Таким образом, только на одной частоте f_0 , определяемой выражением (19), в системе можно обеспечить условия для возбуждения автоколебаний.

4.2. RC-генератор с цепью Вина

Цепью Вина называется четырехполюсник, состоящий из последовательно и параллельно включенных R и C элементов (рис. 6,б). Принципиальная схема RC-генератора с цепью Вина представлена на рис. 6,а. Чтобы определить частоту автоколебаний генератора и необходимый для самовозбуждения коэффициент усиления усилителя, достаточно найти коэффициент передачи $\tilde{\beta}$ цепочки Вина.

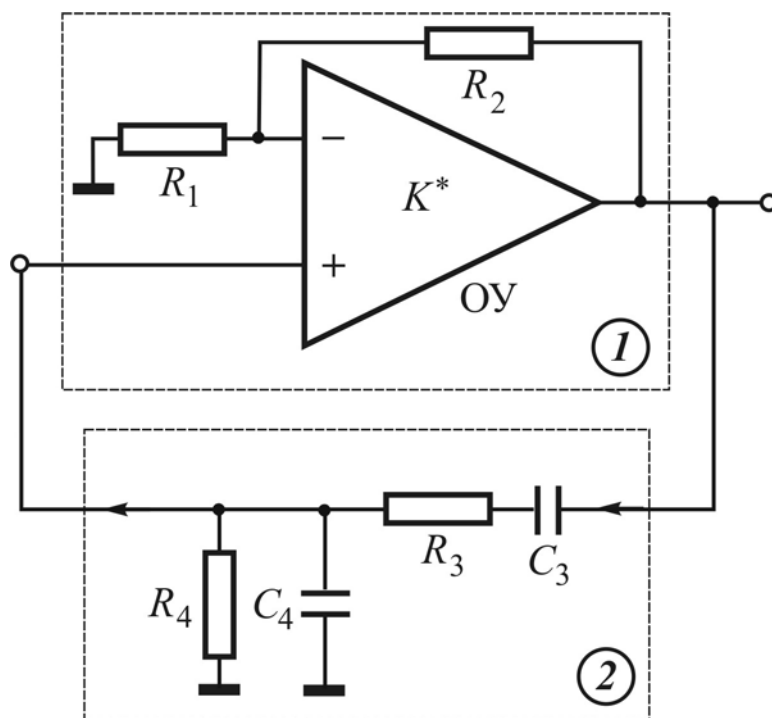
Рассмотрим общий случай, когда емкости и сопротивления цепочки различны: $R_3 \neq R_4$, $C_3 \neq C_4$. В этом случае уравнения Кирхгофа для цепи Вина имеют вид:

$$\begin{aligned}\tilde{U} &= \left(\frac{1}{j\omega C_3} + R_3 \right) \tilde{I} + R_4 \tilde{I}_1 \\ R_4 \tilde{I}_1 &= \frac{1}{j\omega C_4} (\tilde{I} - \tilde{I}_1) \\ \tilde{V} &= R_4 \tilde{I}_1\end{aligned}\quad (21)$$

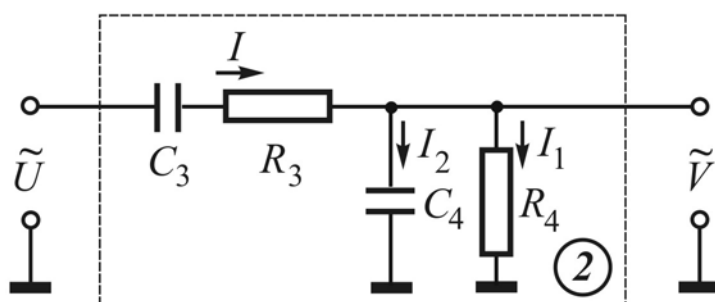
Отсюда получаем следующее выражение для коэффициента передачи цепочки:

$$\tilde{\beta} = \frac{\tilde{V}}{\tilde{U}} = \left[\left(1 + \frac{R_3}{R_4} + \frac{C_4}{C_3} \right) - j \left(\frac{1}{\omega R_4 C_3} - \omega R_3 C_4 \right) \right]^{-1}. \quad (22)$$

Приравнявая коэффициент при мнимой части $\tilde{\beta}$ нулю, находим частоту генерации:



(a)



(б)

Рис. 6. Генератор с цепочкой Вина

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_3 R_4 C_3 C_4}}. \quad (23)$$

На частоте f_0 сдвиг фаз φ_2 между выходным \tilde{V} и входным \tilde{U} сигналами цепи Вина равен нулю, поэтому для выполнения условия баланса фаз в RC -генераторе с цепочкой Вина используется операционный усилитель в неинвертирующем включении.

На частоте f_0 коэффициент передачи цепочки определяется

соотношением

$$\beta(f_0) = \left(1 + \frac{R_3}{R_4} + \frac{C_4}{C_3} \right)^{-1}. \quad (24)$$

Для цепочки Вина с параметрами $R_3 = R_4$ и $C_3 = C_4$ коэффициент передачи равен $\beta(f_0) = 1/3$. Таким образом, условием самовозбуждения RC -генератора с такой цепочкой Вина является неравенство

$$K_U > 3. \quad (25)$$

4.3. Автоматическая регулировка условия баланса амплитуд

В RC -генераторах цепь положительной обратной связи имеет достаточно широкую амплитудно-частотную характеристику. Поэтому даже при незначительном превышении коэффициента усиления над значением, соответствующим условию баланса амплитуд, форма колебаний начинает отличаться от гармонической. Чтобы уменьшить искажения сигнала в таких генераторах, необходимо применять специальные меры для удержания режима работы вблизи порога самовозбуждения. Для этих целей весьма эффективным и простым методом является использование инерционных нелинейных элементов. С их помощью можно построить простейшую систему автоматического регулирования амплитуды генератора, которая удерживает автоколебательную систему вблизи порога самовозбуждения.

Инерционный нелинейный элемент не реагирует на мгновенные значения токов или напряжений; его сопротивление определяется лишь средними значениями. Другими словами, постоянная времени τ , характеризующая инерционность такого элемента, должна быть много больше периода колебаний: $\tau \gg 1/f_0$. Примером инерционного нелинейного сопротивления может служить металлическая нить, нагреваемая переменным током, или специально созданный полупроводниковый терморезистор (термистор). Простейшим инерционным нелинейным терморезистором является лампа накаливания. На рис. 7 представлен качественный вид зависимости сопротивления лампы накаливания

от амплитуды подаваемого на лампу переменного напряжения. В этом случае τ есть постоянная времени установления температуры нити лампы.

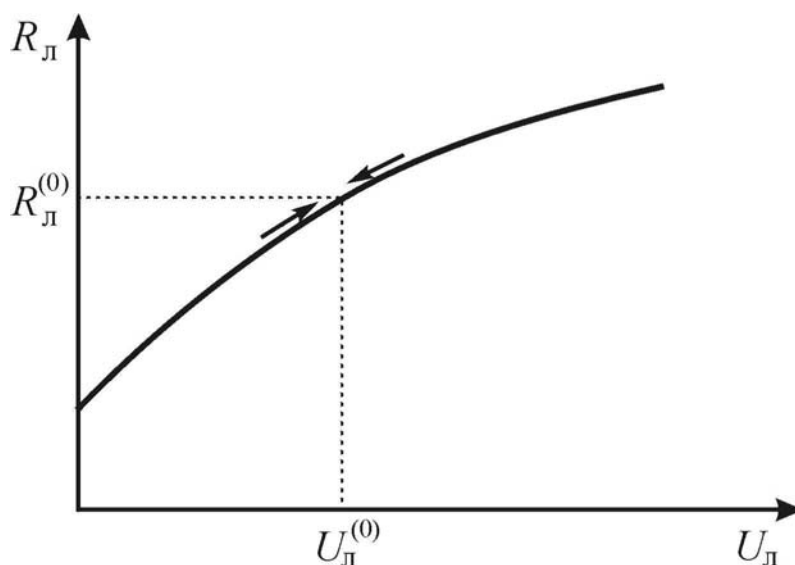


Рис.7. Зависимость сопротивления лампы накаливания от напряжения, подаваемого на лампу

Рассмотрим схему RC -генератора с цепью Вина, в которой реализована система автоматической регулировки условия баланса амплитуд с помощью инерционного нелинейного терморезистора. Предположим, что в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя, параметры которой определяют коэффициент усиления по формуле (13), включена маломощная лампа накаливания ЛН (рис. 8). В этой схеме при повышении амплитуды выходного сигнала нить лампы нагревается до большей температуры, вследствие чего сопротивление лампы $R_{\text{л}}$ возрастает и коэффициент усиления усилителя $K_U = 1 + R_2/R_{\text{л}}$ уменьшается. В случае уменьшения амплитуды генерируемых колебаний коэффициент K_U уменьшается. Таким образом, лампа накаливания действует здесь как автоматический регулятор амплитуды, удерживая режим автоколебаний вблизи порога самовозбуждения. В результате получаем на выходе генератора гармонический сигнал с малыми искажениями. На рис. 7 стрелками показано направление переходных процессов при отклонении от состояния, соответствующего балансу амплитуд. Здесь $R_{\text{л}}^{(0)}$ – сопротивление

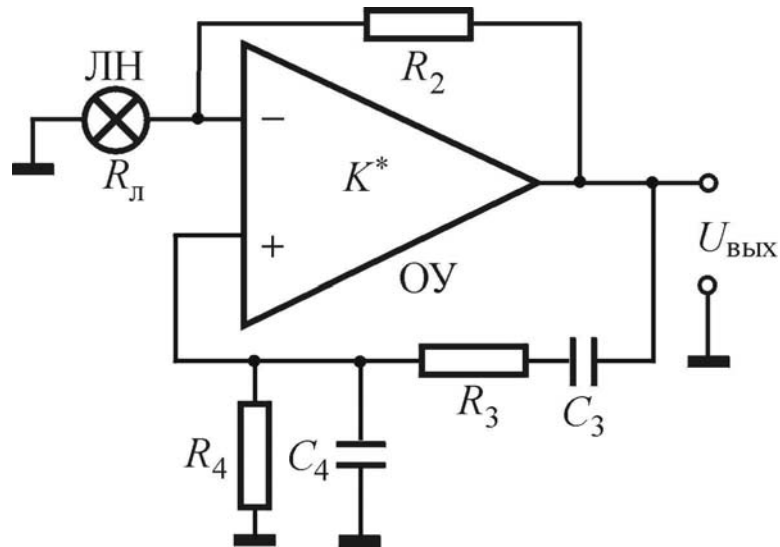


Рис.8. RC-генератор со стабилизацией амплитуды колебаний с помощью лампы накаливания

лампы накаливания, соответствующее пороговому значению коэффициента усиления

$$K_U^{(0)} = 1 + \frac{R_2}{R_{\text{Л}}^{(0)}}, \quad (26)$$

при котором выполняется баланс амплитуд. В этом случае напряжение на выходе генератора определяется выражением

$$U_{\text{ВЫХ}}^{(0)} = U_{\text{Л}}^{(0)} \cdot \frac{R_2 + R_{\text{Л}}^{(0)}}{R_{\text{Л}}^{(0)}}. \quad (27)$$

Большая постоянная времени инерционного элемента является обязательным условием, так как наличие быстродействующего элемента в цепи обратной связи привело бы к искажению генерируемого гармонического сигнала.

5. Экспериментальная установка

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 9 и приведена на верхней панели установки. Включение питания установки

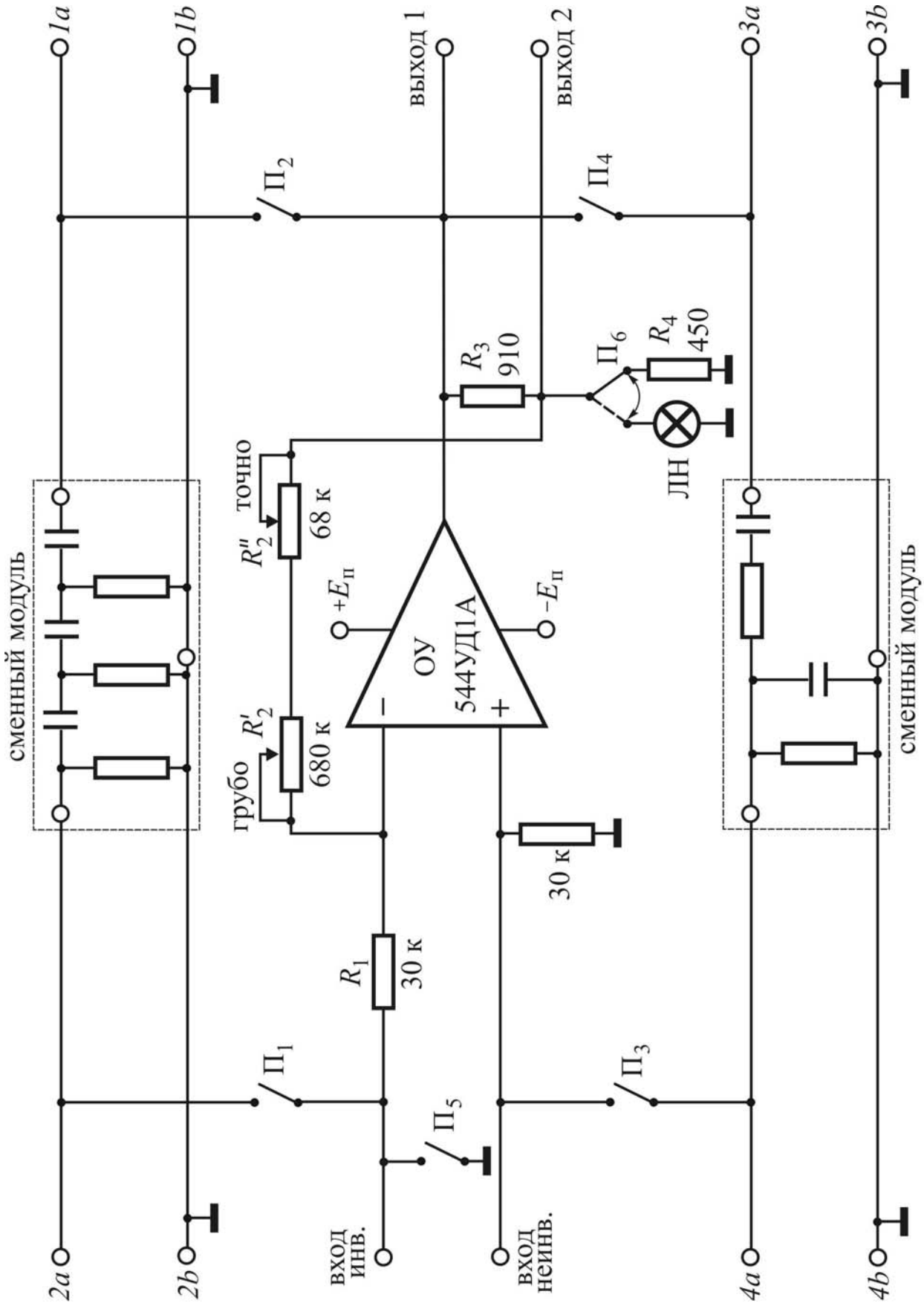


Рис.9. Схема экспериментальной установки

$(+E_{II}, -E_{II})$ индицируется светодиодами. Тумблеры Π_1, Π_2, Π_3 и Π_4 позволяют подключать к усилителю и отключать от усилителя внешние цепи обратной связи: Π_1 и Π_2 – четырехзвенную фазосдвигающую RC -цепь, а Π_3 и Π_4 – цепочку Вина. Цепочки смонтированы в отдельных сменных модулях и могут заменяться.

Тумблер Π_5 заземляет инвертирующий вход операционного усилителя при его исполнении в неинвертирующем включении. Изменение коэффициента усиления усилителя производится переменными резисторами $R'_2 = 680$ кОм (грубо) и $R''_2 = 68$ кОм (точно), включенными последовательно. Величина коэффициента усиления может регулироваться в пределах $K_U = 3 \div 78$. Усилитель имеет линейную амплитудную характеристику $U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}}) = K_U \cdot U_{\text{ВХ}}$ до значений выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}} = 5$ В.

Схема усилителя в экспериментальной установке немного отличается от схемы, приведенной на рис. 8. Объясняется это следующими причинами. Входное сопротивление инвертирующего усилителя определяется величиной сопротивления R_1 . Для того, чтобы это сопротивление не влияло на параметры фазовращающих цепей, задающих баланс фаз, его величина (30 кОм) выбрана много больше сопротивления фазовращающих цепей. Однако большая величина сопротивления R_1 не позволяет заменить его термистором типа лампы накаливания, сопротивление которой много меньше. Поэтому в установке цепь отрицательной обратной связи усилителя создана из двух каскадов деления выходного напряжения: высокоомного делителя R_2R_1 и низкоомного делителя R_3R_4 или R_3R_{II} . Это позволяет, с одной стороны, обеспечить необходимый ток через лампу накаливания, а с другой стороны, – реализовать достаточно высокое входное сопротивление усилителя. Включение в низкоомный делитель резисторов R_4 или R_{II} осуществляется тумблером Π_6 .

В случае двухкаскадного делителя в цепи обратной связи усилителя общий коэффициент передачи цепи определяется выражением

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4}. \quad (28)$$

Поэтому, в соответствии с формулой (8), коэффициент усиления

$$K_U = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right). \quad (29)$$

Если в низкоомный делитель включена лампа накаливания, то в выражении (29) вместо R_4 необходимо подставить величину $R_{л}$.

Помимо лабораторной установки, в задаче используются заводские приборы:

- генератор гармонических колебаний Г 3-11;
- милливольтметр В 3-38А для измерения эффективных значений переменного напряжения;
- двухлучевой осциллограф С 1-55.

6. Методика измерений и упражнения

Перед началом выполнения упражнений необходимо:

- внимательно ознакомиться с инструкциями по работе с генератором, осциллографом и милливольтметром;
- рассчитать частоту f_0 и коэффициент передачи $\beta(f_0)$ цепочки Вина, имеющей параметры: $R_3 = 12$ кОм, $R_4 = 1,2$ кОм, $C_3 = 5$ нФ и $C_4 = 0,05$ мкФ;
- получить выражение для коэффициента передачи четырехзвенной фазовращающей цепочки с параметрами $R = 1$ кОм, $C = 0,1$ мкФ и рассчитать для нее частоту f_0 и коэффициент передачи $\beta(f_0)$.

Упражнение 6.1. Измерение коэффициента передачи цепочки Вина

6.1.1. Изучение амплитудно-частотной характеристики цепочки Вина

С помощью тумблеров Π_1 , Π_2 , Π_3 и Π_4 отключить цепочку Вина и фазовращающую цепочку RC от усилителя. На вход цепочки Вина $3a-3b$ подать

сигнал с генератора гармонических колебаний. Снять зависимость модуля коэффициента передачи цепочки β от частоты. Входное напряжение на клеммах $3a-3b$ и выходное напряжение на клеммах $4a-4b$ измерять вольтметром. Измерения АЧХ производить в диапазоне частот от 400 Гц до 20 кГц при входном сигнале $U_{вх}$ не превышающем 10 В. По формуле (22) построить теоретическую зависимость $\beta(f)$, а результаты измерений нанести на этот же график точками. Частоту на графике откладывать в логарифмическом масштабе.

6.1.2. Исследование фазовой характеристики цепочки Вина

В том же частотном диапазоне снять фазовую характеристику цепочки Вина, т.е. зависимость фазового сдвига φ_2 , создаваемого цепочкой, от частоты f . Для этого на вход Y1 двухлучевого осциллографа подать сигнал с входных клемм $3a-3b$, а на вход Y2 одновременно подать сигнал с выходных клемм $4a-4b$. Фазовый сдвиг φ определяется непосредственно на экране электронно-лучевой трубки по относительному сдвигу двух синусоидальных сигналов.

Измерения удобно проводить следующим образом. Подобрать длительность развертки так, чтобы один период синусоидального сигнала, соответствующий 360° , занимал длину, равную, например, 8 клеткам. Тогда одна клетка будет соответствовать 45° . Отрегулировав амплитуды сигналов с помощью ручек усиления каналов Y1 и Y2 до равной величины, можно измерить расстояние в клетках между соответствующими точками синусоид. Умножив это расстояние на число градусов, приходящихся на одну клетку, получим сдвиг фаз в градусах.

По формуле (22) рассчитать и построить в логарифмическом масштабе теоретическую зависимость $\varphi_2(f)$; результаты измерений нанести на этот же график точками. На основании результатов измерений определить частоту f_0 , на которой фазовый сдвиг $\varphi_2 = 0^\circ$.

Упражнение 6.2. Изучение RC-генератора с цепью Вина

6.2.1. Измерение частоты генерации

Тумблерами Π_3 и Π_4 включить цепочку Вина в цепь генератора. Убедиться, что тумблеры Π_1 и Π_2 при этом отключены, а тумблер Π_6 находится в положении « R_4 ». Инвертирующий вход усилителя с помощью тумблера Π_5 заземлить. Подключить выход генератора («выход 1») к входу $Y1$ осциллографа. Регулируя коэффициент усиления усилителя изменением резисторов R'_2 (грубо) и R''_2 (точно), возбудить колебания в генераторе. Обратить внимание на изменение формы колебаний при изменении коэффициента усиления. Добиться, чтобы колебания имели форму, наиболее близкую к синусоидальной.

Измерить частоту генерации с помощью фигур Лиссажу. Для этого отключить внутреннюю развертку осциллографа, а на его вход X подать сигнал с генератора гармонических колебаний. Измеренное значение частоты сопоставить с рассчитанным значением f_0 .

6.2.2. Проверка условия баланса амплитуд

Измерить коэффициент усиления усилителя K_U для режима генерации, максимально близкого к порогу самовозбуждения. Для этого отключить цепочку Вина тумблерами Π_3 и Π_4 . На неинвертирующий вход усилителя подать сигнал от внешнего генератора с частотой, измеренной в предыдущем упражнении, и напряжением не более 0.2 В. Милливольтметром измерить входное и выходное (на «выходе 1») напряжение и рассчитать коэффициент усиления K_U . Вычислить произведение $K_U \cdot \beta(f_0)$.

Упражнение 6.3. Изучение *RC*-генератора с 4-звенной фазовращающей цепочкой

6.3.1. Изучение амплитудно-частотной характеристики фазовращающей цепочки

С помощью тумблеров Π_1 , Π_2 , Π_3 и Π_4 отключить цепочку Вина и фазовращающую цепочку *RC* от усилителя. На вход фазовращающей цепочки *1a-1b* подать сигнал с генератора гармонических колебаний. Снять зависимость модуля коэффициента передачи цепочки β от частоты. Входное напряжение на клеммах *1a-1b* и выходное напряжение на клеммах *2a-2b* измерять вольтметром. Измерения АЧХ производить в диапазоне частот от 400 Гц до 3.5 кГц при входном сигнале $U_{\text{вх}}$ не превышающем 10 В. По полученной формуле для коэффициента передачи построить теоретическую зависимость $\beta(f)$, а результаты измерений нанести на этот же график точками. Частоту на графике откладывать в логарифмическом масштабе.

6.3.2. Измерение частоты генерации

Тумблерами Π_1 и Π_2 включить фазовращающую цепочку в цепь генератора. Убедиться, что тумблеры Π_3 и Π_4 при этом отключены, а тумблер Π_6 находится в положении « R_4 ». Инвертирующий вход усилителя с помощью тумблера Π_5 отсоединить от земли. Подключить выход генератора («выход 1») к входу $Y1$ осциллографа. Регулируя коэффициент усиления усилителя резисторами R'_2 и R''_2 , возбудить колебания в генераторе. Добиться, чтобы колебания имели форму, наиболее близкую к синусоидальной.

Измерить частоту генерации с помощью фигур Лиссажу по методике, описанной в п. 6.2.1. Измеренное значение частоты сопоставить с рассчитанным значением f_0 .

6.3.3. Измерение фазовых сдвигов в 4-звенной цепочке

Определить фазовые сдвиги между напряжениями на звеньях цепочки *RC*

в возбужденном состоянии генератора. Для этого на вход Y1 осциллографа подать гармонические колебания с клемм $1a-1b$, а на вход Y2 последовательно подавать сигналы с 1-го, 2-го, 3-го и 4-го звена RC-цепочки. Измерение фазовых сдвигов произвести по методике, описанной в п. 6.1.2. Результаты измерений фазовых сдвигов φ_N представить графически в виде зависимости $\varphi_N(N)$, где N – номер звена.

6.3.4. Проверка условия баланса амплитуд

Измерить коэффициент усиления усилителя K_U для режима генерации, максимально близкого к порогу самовозбуждения. Для этого отключить цепочку RC тумблерами Π_1 и Π_2 . На инвертирующий вход усилителя подать сигнал от внешнего генератора с частотой, измеренной в п. 6.3.2, и напряжением не более 0.2 В. Милливольтметром измерить входное и выходное (на «выходе 1») напряжение и рассчитать коэффициент усиления K_U . Вычислить произведение $K_U \cdot \beta(f_0)$.

Упражнение 6.4. Изучение эффекта автоматической регулировки баланса амплитуд с помощью нелинейного терморезистора

В этом упражнении исследования проводятся с использованием только RC-генератора с цепью Вина.

6.4.1. Изучение характеристики лампы накаливания

Снять зависимость сопротивления $R_{\text{л}}$ нелинейного терморезистора – лампы накаливания – от приложенного к нему напряжения $U_{\text{л}}$. Для этого тумблерами Π_1 и Π_2 отключить от генератора фазовращающую цепочку, а инвертирующий вход усилителя с помощью тумблера Π_5 заземлить. Перевести тумблер Π_6 в положение «ЛН». Убедиться, что цепочка Вина отключена от генератора. С помощью резисторов R'_2 и R''_2 в цепи отрицательной обратной связи установить минимальное значение коэффициента усиления усилителя.

Подключить милливольтметр к «выходу 1» установки. На неинвертирующий вход операционного усилителя подать сигнал от внешнего генератора с частотой, измеренной в п. 6.2.1, и таким напряжением, чтобы милливольтметр показывал $U_{\Sigma} = 1$ В. Для этого состояния измерить напряжение $U_{\text{л}}$ на лампе накаливания, подключив милливольтметр к «выходу 2». Зная величину резистора делителя $R_3 = 910$ Ом, по двум значениям U_{Σ} и $U_{\text{л}}$ можно рассчитать ток через лампу и далее найти ее сопротивление $R_{\text{л}}$. Подобные измерения провести в диапазоне напряжений U_{Σ} от 1 до 10 В. Результаты измерений представить в виде графика $R_{\text{л}}(U_{\text{л}})$.

6.4.2. Наблюдение эффекта стабилизации гармонического режима RC-генератора

Отсоединить внешний генератор от неинвертирующего входа установки и включить с помощью тумблеров П_3 и П_4 цепочку Вина в цепь генератора. Перевести тумблер П_6 в положение « R_4 ». Подключить выход генератора («выход 1») к входу осциллографа. Регулируя коэффициент усиления усилителя резисторами R'_2 и R''_2 , возбудить колебания в генераторе с небольшими, но хорошо заметными отклонениями формы колебаний от синусоидальной. Переключить тумблер П_6 в положение «ЛН» и убедиться, что форма колебаний стала синусоидальной. Зарисовать форму колебаний в обоих случаях. Измерить милливольтметром напряжение $U_{\text{л}}$ на лампе накаливания (на «выходе 2») и нанести измеренное значение на график, полученный в п. 6.4.1.

7. Контрольные вопросы

1. Каковы особенности RC-генераторов, их достоинства и недостатки?
2. Что такое обратная связь и для чего она используется?
3. Какие бывают виды обратной связи?
4. Что собой представляют операционные усилители и каковы их свойства?

5. Нарисуйте принципиальные схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителя на базе ОУ.
6. Сформулируйте условия баланса фаз и амплитуд и объясните их физический смысл.
7. Чем определяется амплитуда стационарных колебаний в генераторе?
8. Какое количество RC -звеньев может быть в генераторе с фазовращающей цепочкой?
9. Почему в RC -генераторе фазовращающая цепочка и цепочка Вина подключаются к разным входам ОУ.
10. Объясните принцип действия терморезистора, используемого в RC -генераторе для стабилизации гармонического режима колебаний.

Литература

1. *Основы радиофизики.* / Под ред. проф. А.С. Логгинова. М., УРСС, 1996.
2. Кузнецов Ю.И., Логгинов А.С., Митрофанов В.П., Сенаторов К.Я. *Усилители и RC -генераторы низкой частоты на транзисторах и интегральных схемах.* – М., изд. Моск. ун-та, 1983.
3. *Практикум по радиоэлектронике.* / Под ред. проф. А.П. Сухорукова. – М., изд. Моск. ун-та, 1997.
4. Мигулин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. *Основы теории колебаний.* – М., Наука, 1978.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1.	Введение	3
2.	Общие сведения о генераторах электрических колебаний ..	4
3.	Усилители на основе ОУ	6
	3.1. Общие сведения об ОУ	6
	3.2. Обратные связи в усилителях	7
	3.3. Инвертирующий усилитель на основе ОУ	9
	3.4. Неинвертирующий усилитель на основе ОУ	10
4.	Теория RC-генераторов	12
	4.1. RC-генератор с трехзвенной фазовращающей цепочкой	12
	4.2. RC-генератор с цепью Вина	15
	4.3. Автоматическая регулировка условия баланса амплитуд	17
5.	Экспериментальная установка	19
6.	Методика измерений и упражнения	22
7.	Контрольные вопросы	27
	Литература	28