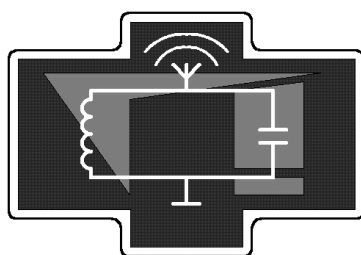


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ М. В. ЛОМОНОСОВА  
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Ю. И. Кузнецов, В. М. Шахпаронов

# РС-ГЕНЕРАТОР

Методическая разработка  
для «Практикума по радиофизике»



Москва — 2016

УДК 537.862:621.373.121.15

**Юрий Иванович Кузнецов,  
Владимир Михайлович Шапаронов.**

*RC*-генератор. Методическая разработка для «Практикума по радиофизике». — М.: изд. физического факультета МГУ, 2016, 11 с.: ил.

Методическая разработка предназначена для студентов 3 курса физического факультета МГУ, выполняющих задачи в «Практикуме по радиофизике». В разработке изложены физические принципы работы и методы расчета генераторов электрических почти гармонических колебаний. В качестве примера предлагается изучение работы *RC*-генератора на операционном усилителе с цепью Вина.

## Краткие сведения о генераторах электрических колебаний

Генераторы незатухающих электрических колебаний представляют собой устройства, преобразующие энергию постоянного тока источника питания в энергию электрических колебаний. Они могут быть сконструированы для генерирования как колебаний, близких к гармоническим, так и колебаний релаксационного типа, содержащих много гармоник (см. [1, с. 116–119]).

В реальной электрической цепи всегда существуют потери электромагнитной энергии и в силу этого невозможны незатухающие электрические колебания. Поэтому 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.

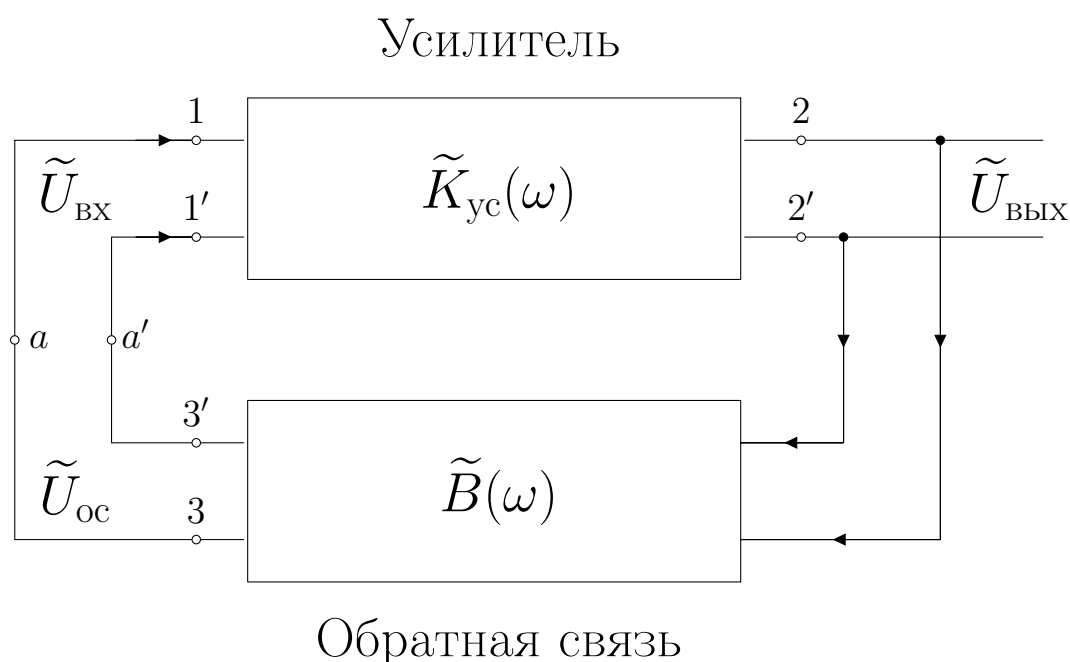


Рис. 1: Блок-схема подключения обратной связи к усилителю.

Другим необходимым элементом генератора является цепь **обратной связи**. Обратной связью называют передачу энергии сигнала (или её части) с выхода активной системы на её вход. Если в усилителях обычно используют отрицательную обратную связь (см. лабораторную работу

«Усилитель на транзисторе», «Операционный усилитель»), то в генераторах имеет место положительная обратная связь.

Большинство схем генераторов можно представить в виде усилителя, охваченного с выхода на вход положительной обратной связью (см. [3, с. 167–168]), как показано на рис. 1.

Физический смысл обратной связи состоит в том, что если разорвать соединение  $a-a'$  выхода цепи обратной связи  $3-3'$  с входом усилителя  $1-1'$  (см. рис. 1), то при подаче периодического сигнала на вход усилителя на выходе цепи обратной связи сигнал будет в фазе (с точностью до  $2\pi n$ ,  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) с сигналом на входе усилителя.

Важной практической задачей является нахождение условий самовозбуждения колебаний в таких схемах и нахождение параметров генерируемых колебаний — амплитуды и частоты. Строгое решение этой задачи является достаточно громоздким, т.к. любой генератор электрических колебаний представляет собой принципиально нелинейную систему. Однако для генераторов почти гармонических колебаний **условия самовозбуждения** и частоту колебаний можно найти в линейном приближении.

Найдём условия генерации почти гармонических колебаний. Разомкнем цепь обратной связи в точках  $a-a'$ . Пусть на входе усилителя  $1-1'$  действует гармонический сигнал  $\tilde{U}_{\text{вх}} = U_{\text{вх}0} e^{j\omega t}$ . Если на выходе цепи обратной связи  $3-3'$  для некоторой частоты  $\omega_0$  получим сигнал  $\tilde{U}_{\text{ос}}$ , равный по амплитуде и фазе (с точностью до  $2\pi n$ ,  $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ ) входному сигналу

$$\tilde{U}_{\text{ос}} = \tilde{U}_{\text{вх}}, \quad (1)$$

то при замыкании обратной связи в системе могут существовать незатухающие колебания.

В общем случае коэффициент усиления усилителя  $\tilde{K}_{\text{yc}}(\omega)$  и коэффициент передачи цепи обратной связи  $\tilde{B}(\omega)$  зависят от частоты сигнала и являются комплексными величинами. Условие (1) в этом случае запишется в виде:

$$\tilde{U}_{\text{ос}} = \tilde{U}_{\text{вх}} \tilde{K}_{\text{yc}}(\omega) \tilde{B}(\omega) = \tilde{U}_{\text{вх}},$$

или

$$\tilde{K}_{\text{yc}}(\omega) \tilde{B}(\omega) = 1. \quad (2)$$

Условие (2) эквивалентно двум условиям:

$$|\tilde{K}_{\text{yc}}(\omega) \tilde{B}(\omega)| = 1, \quad (3a)$$

$$\varphi_K + \varphi_B = 2\pi n, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (3б)$$

где

$$\varphi_K = \arg \tilde{K}_{yc}(\omega), \quad (4a)$$

$$\varphi_B = \arg \tilde{B}(\omega). \quad (4б)$$

Здесь  $\varphi_K$  и  $\varphi_B$  физически представляют собой сдвиги фаз сигналов на выходах соответственно усилителя и цепи обратной связи относительно гармонического сигнала частоты  $\omega$  на их входах.

Условия самовозбуждения (3а)–(3б) интерпретируются как одновременное выполнение для некоторой частоты  $\omega_0$  двух условий — **баланса амплитуд** (3а) и **баланса фаз** (3б). Из этих условий можно найти значения параметров схемы, при которых происходит самовозбуждение гармонических колебаний, и частоту  $\omega_0$  этих колебаний.

Амплитуда стационарных колебаний частоты  $\omega_0$  определяется нелинейностью элементов, входящих в генератор (см. [1, с. 109–111]).

В значительном числе генераторов обычно используют  $LC$ -контур (см. [3, с. 168–172]). Однако для генерирования низких частот в этих схемах требуется применять большие величины  $L$  и  $C$ , что приводит к увеличению размера и веса генератора. Поэтому для построения генераторов колебаний низкой частоты широкое распространение получили схемы с использованием только  $R$  и  $C$  элементов. Основными достоинствами  $RC$ -генераторов являются простота, малые габариты и вес. Эти преимущества особенно ярко проявляются при генерировании низких частот. В дальнейшем будет рассмотрена схема  $RC$ -генератора низкой частоты на операционном усилителе с цепью Вина в контуре положительной обратной связи.

## RC-генератор с цепью Вина

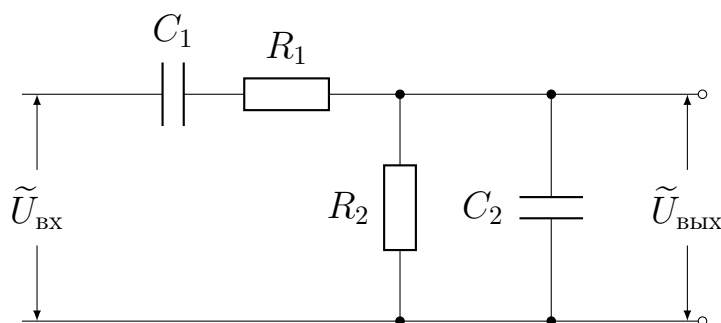


Рис. 2: Цепь Вина.

При построении  $RC$ -генераторов электрических колебаний для создания частотнозависимой обратной связи, позволяющей выполнить усло-

вие баланса фаз на одной частоте, достаточно часто используют цепь Вина (рис. 2). В качестве активного элемента обычно применяют усилитель низкой частоты, выполненный на операционном усилителе.

Коэффициент передачи цепи Вина для гармонического сигнала частоты  $\omega$  равен (см. лабораторную работу «RC-цепи»)

$$\tilde{B}(\omega) = \frac{\tilde{U}_{\text{ВЫХ}}}{\tilde{U}_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{\left(1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}\right) + j \left(\frac{\omega^2 R_1 C_1 R_2 C_2 - 1}{\omega C_1 R_2}\right)}. \quad (5)$$

Важной особенностью цепи Вина является то, что на частоте

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}}, \quad (6)$$

фазовый сдвиг выходного сигнала относительно гармонического входного сигнала равен нулю. Модуль коэффициента передачи цепи Вина на этой частоте принимает максимальное значение и равен

$$|\tilde{B}(\omega_0)| = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}} < 1. \quad (7)$$

На рис. 3 представлены типичные зависимости модуля коэффициента передачи и сдвига фаз цепи Вина от частоты, в случае, когда  $C_1 = C_2$  и  $R_1 = R_2$ .

При использовании операционного усилителя (ОУ) в качестве активного элемента RC-генератора цепь Вина включают между выходом и неинвертирующим входом операционного усилителя (рис. 4). Если в неинвертирующем усилителе (на рис. 4 он выделен пунктирной линией) элементы отрицательной обратной связи не зависят от частоты, то сдвиг фаз между выходным и входным сигналами равен нулю (см. лабораторную работу «Операционный усилитель»). Это обеспечивает выполнение баланса фаз на единственной частоте  $\omega_0$  (6). Из условия баланса амплитуд (3а) следует, что необходимый коэффициент передачи усилителя

$$|\tilde{K}_{\text{yc}}(\omega_0)| = 1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2} > 1. \quad (8)$$

В свою очередь, его величина может быть установлена резисторами  $R_3, R_4$ , включенными в цепь отрицательной обратной связи усилителя. Напомним (см. лабораторную работу «Операционный усилитель»), что для неинвертирующего усилителя на основе идеального ОУ:

$$|\tilde{K}_{\text{yc}}| = 1 + \frac{R_3}{R_4}, \quad (9)$$

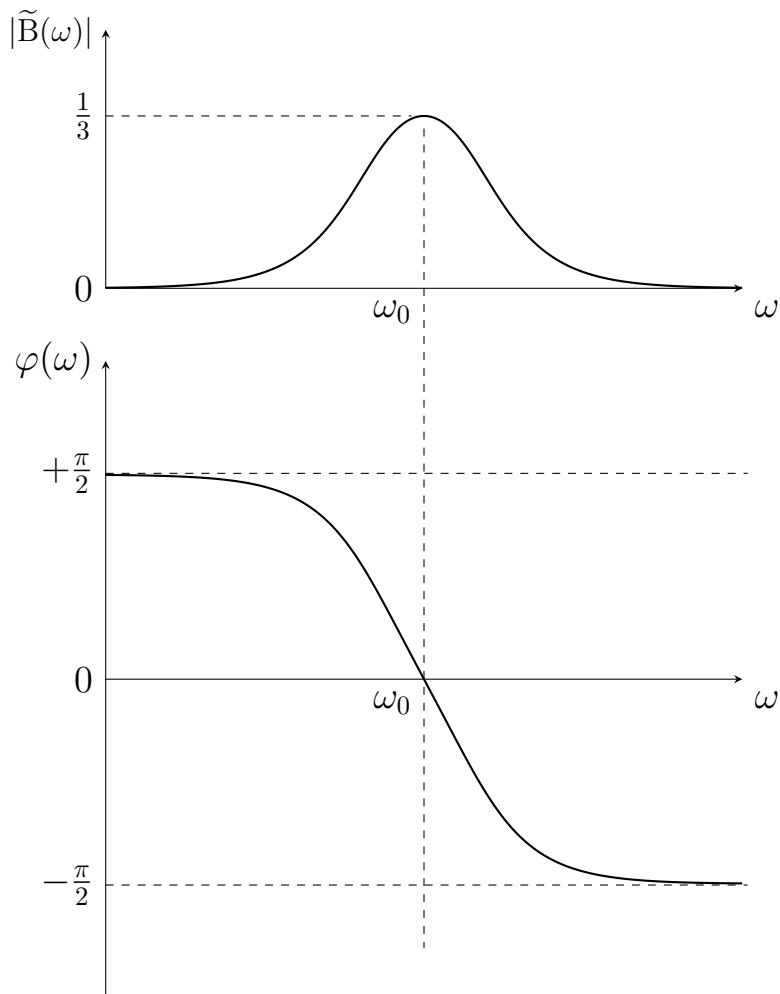


Рис. 3: АЧХ и ФЧХ цепи Вина,  $R_1 = R_2$ ,  $C_1 = C_2$ . Частота представлена в логарифмическом масштабе.

Таким образом, величиной  $R_4$  можно изменять коэффициент передачи усилителя в широких пределах.

Наиболее широкое распространение для RC-генераторов получила цепь Вина, в которой  $R_1 = R_2 = R$  и  $C_1 = C_2 = C$ . Такая цепь позволяет при использовании сдвоенного блока одинаковых переменных сопротивлений или конденсаторов создать RC-генератор с перестраиваемой частотой, сохраняя баланс амплитуд и фаз в широком диапазоне перестройки частоты. В этом случае

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}, \tag{10a}$$

$$|\tilde{B}(\omega_0)| = \frac{1}{3}. \tag{10б}$$

Из (3а) следует, что для выполнения условия баланса амплитуд необ-

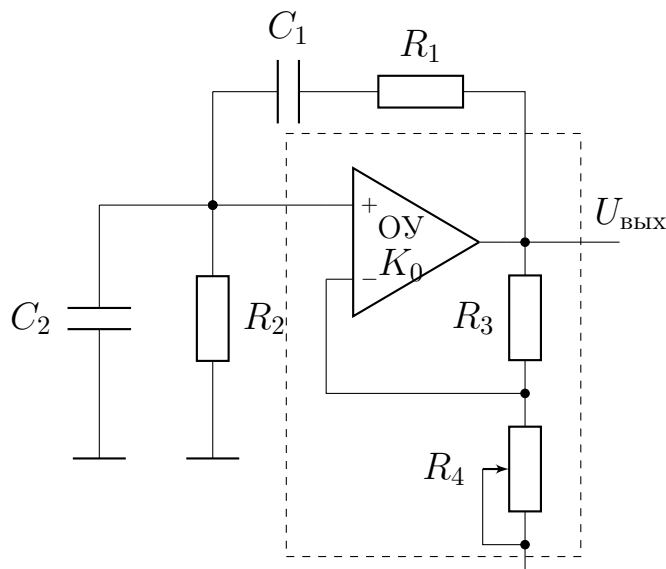


Рис. 4: Принципиальная схема RC-генератора на операционном усилителе.

ходим коэффициент передачи усилителя

$$|\tilde{K}_{yc}(\omega_0)| \geq 3. \tag{11}$$

В качестве примера на рис. 5 представлена схема RC-генератора с цепью Вина на операционном усилителе КР140УД8. Пусть задана частота генерации  $f_0 \approx 10$  кГц. Используемый в схеме операционный усилитель КР140УД8 имеет частоту единичного усиления  $f_1 = 1$  МГц, что определяет следующие частотные свойства усилителя в данной схеме: верхняя частота  $f_v = f_1/|\tilde{K}_{yc}| = 10^6 \text{ Гц}/3 = 0,33 \text{ МГц}$  (см. [2, с. 64]). Поскольку  $f_v = 0,33 \text{ МГц} > f_0 = 10 \text{ кГц}$ , то выбор операционного усилителя является вполне удовлетворительным с точки зрения его частотных свойств.

Выбор величины сопротивлений  $R$  и  $(R_3 + R_4)$  определяется параметрами операционного усилителя (см. лабораторную работу «Операционный усилитель»). Минимальное значение сопротивления нагрузки операционного усилителя КР140УД8  $R_{\text{нmin}} = 2 \text{ кОм}$  ограничивает снизу величину  $(R_3 + R_4)$ . Входное сопротивление операционного усилителя  $R_{\text{вх}}$  ограничивает величину  $R$  сверху. В приведенном примере  $(R_3 + R_4) > > 3,7 \text{ кОм} > R_{\text{нmin}} = 2 \text{ кОм}$  и  $R = 10 \text{ кОм} < R_{\text{вх}} \approx 400 \text{ кОм}$ . Переменный резистор 470 Ом позволяет плавно регулировать коэффициент передачи усилителя вблизи порогового значения  $|\tilde{K}_{yc}| = 1 + R_3/R_4 = 3$  с целью уменьшения искажения сигнала. Выбор  $R = 10 \text{ кОм}$  однозначно определяет ёмкость  $C = 1/(2\pi f_0 R) = 1,6 \text{ нФ}$ .

В RC-генераторах цепь положительной обратной связи имеет достаточно широкополосную амплитудно-частотную характеристику. Поэтому даже при незначительном превышении коэффициента усиления



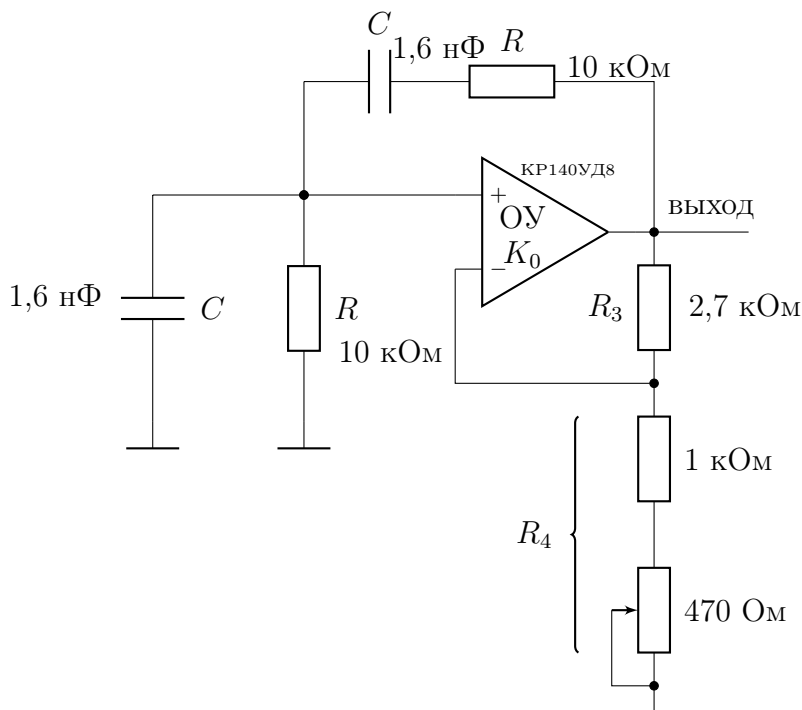


Рис. 5: Пример схемотехнического решения.

над значением, соответствующим условию «баланса амплитуд», у RC-генераторов колебания на выходе тем ближе по форме к гармоническим, чем ближе величина  $|\tilde{K}_{yc}(\omega)\tilde{B}(\omega)|$  к единице (порогу возбуждения). При  $|\tilde{K}_{yc}(\omega)\tilde{B}(\omega)| > 1$  форма колебаний начинает отличаться от гармонической (см. [4, с. 95–96]).

Для уменьшения искажений в таких генераторах обычно применяют простейшие системы автоматического регулирования амплитуды, которые удерживают режим работы генератора вблизи порога самовозбуждения (см. [2, с. 81–84]). В этих системах обычно используют нелинейные элементы, сопротивление которых зависит от протекающего по ним тока или от приложенного к ним напряжения. Примером такого нелинейного сопротивления может служить металлическая нить, нагреваемая переменным током, или специально созданный полупроводниковый терморезистор (термистор). Простейшим терморезистором является лампа накаливания. На рис. 7 представлен качественный вид зависимости сопротивления лампы накаливания  $R_{\text{Л}}$  от амплитуды подаваемого на лампу переменного напряжения  $U_{\text{Л}^0_{\text{эф}}}$ .

Рассмотрим схему RC-генератора на операционном усилителе с цепью Вина, в которой реализована простейшая система автоматической регулировки условия «баланса амплитуд» с помощью использования терморезистора (см. [2, с. 81–83]). Для этого в цепь отрицательной обратной связи, параметры которой определяют коэффициент усиления, включе-

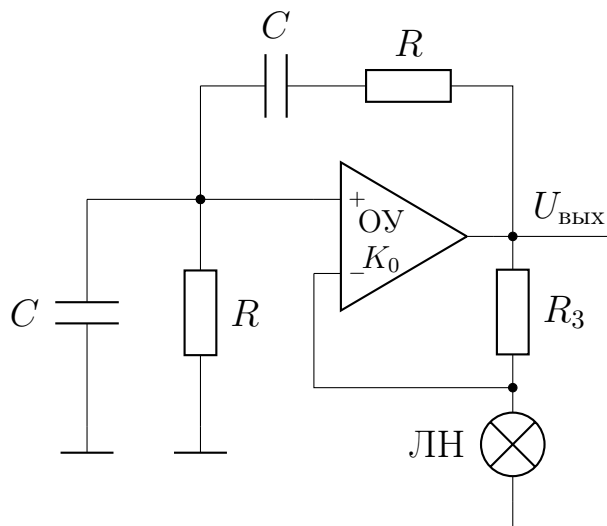


Рис. 6: Включение лампы накаливания в цепь отрицательной обратной связи.

на маломощная лампа накаливания ЛН, как показано на рис. 6.

При превышении уровня выходного сигнала над уровнем стационарной генерации нить лампы накаливания нагревается до большей температуры, сопротивление лампы  $R_{\text{Л}}$  увеличивается, в результате чего коэффициент передачи усилителя  $|\tilde{K}_{\text{ус}}| = 1 + R_3/R_{\text{Л}}$  уменьшается; при уменьшении уровня выходного сигнала коэффициент передачи  $|\tilde{K}_{\text{ус}}|$  увеличивается. Таким образом, лампа накаливания действует как автоматический регулятор амплитуды, удерживающий режим автоколебаний вблизи порога самовозбуждения. В результате будем иметь на выходе гармонический сигнал с малыми искажениями. На рис. 7 стрелками показано направление переходных процессов при отклонениях от состояния, соответствующего условию баланса амплитуд. Здесь  $R_{\text{Л}^0}$  — сопротивление лампы накаливания, соответствующее по-

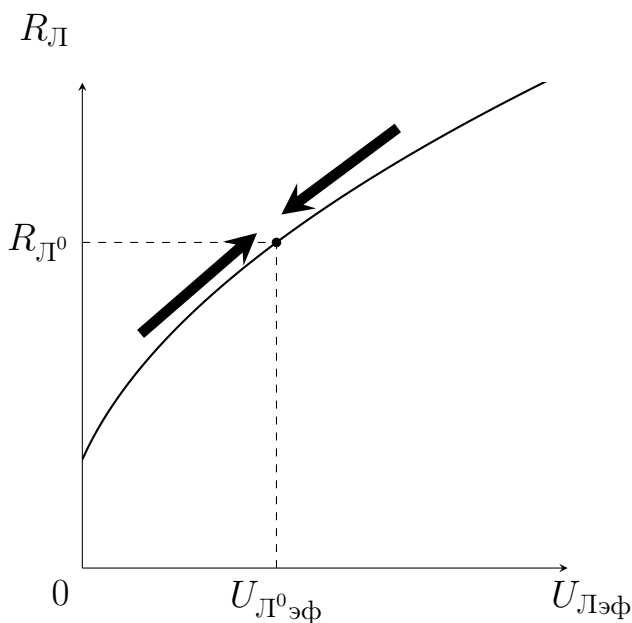


Рис. 7: Зависимость сопротивления лампы накаливания  $R_{\text{Л}}$  от амплитуды подаваемого на лампу переменного напряжения  $U_{\text{Л}^{\text{эф}}}$ .

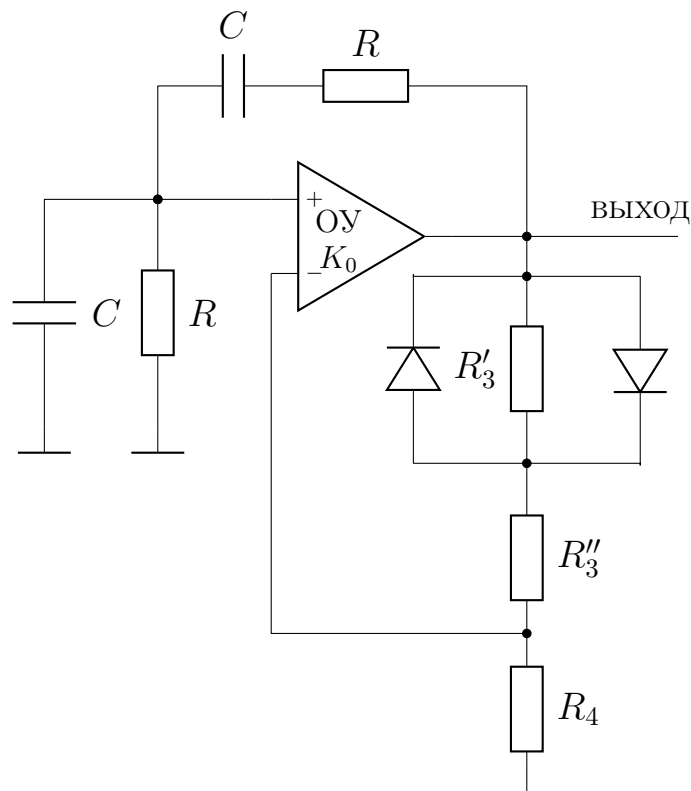


Рис. 8: Ограничение и стабилизация амплитуды стационарных колебаний при помощи двух встречно-параллельных диодов.

роговому значению коэффициента передачи усилителя

$$|\tilde{K}_{yc0}| = 1 + \frac{R_3}{R_{Л0}}, \tag{12}$$

при котором выполняется баланс амплитуд. Величина напряжения на выходе генератора

$$U_{\text{ВЫХ}^0\text{эф}} = U_{Л^0\text{эф}} \frac{R_3 + R_{Л0}}{R_{Л0}}. \tag{13}$$

Здесь  $U_{Л^0\text{эф}}$  — эффективное значение переменного напряжения на сопротивлении  $R_{Л0}$  лампы накаливания в режиме стационарной генерации.

Для стабилизации амплитуды выходного сигнала помимо термистора в цепи отрицательной обратной связи можно использовать схему, состоящую из детектора и полевого транзистора (см. [2, с. 83–85]). Последний при малых напряжениях на затворе ведет себя как сопротивление, управляемое напряжением.

Если некоторые искажения генерируемого гармонического сигнала являются допустимыми, то ограничить и стабилизировать амплитуду стационарных колебаний также можно путем использования двух встре-

чно-параллельно соединенных (анод к катоду) диодов, которые шунтируют часть сопротивления в цепи отрицательной обратной связи, как это показано на рис. 8.

## Практическая часть

1. По заданной частоте генерации  $f_0$  рассчитайте параметры цепи Вина при условии, что  $R_1 = R_2 = R$  и  $C_1 = C_2 = C$ .
2. Соберите RC-генератор согласно схеме рис. 4 (см. с. 6) на плате «Операционный усилитель».
3. Подключите к плате источник питания, а к выходу генератора осциллограф.
4. Отрегулируйте сопротивление переменного резистора  $R_4$  до получения колебаний.
5. Изменяя сопротивление  $R_4$  в небольших пределах вблизи порога возбуждения, наблюдайте изменение формы колебаний.
6. Получив колебания, близкие к гармоническим, с помощью осциллографа измерьте частоту автоколебаний. Измерение проведите двумя способами:
  - а) используя откалиброванную внутреннюю развертку осциллографа,
  - б) с помощью фигур Лиссажу.

В последнем случае используйте осциллограф в режиме внешней развертки, на вход  $X$  подайте сигнал с внешнего генератора, а на вход  $Y$  сигнал с выхода исследуемого RC-генератора.

7. Сравните экспериментальное значение частоты генерации с теоретическим.

## Контрольные вопросы

1. Какой вид обратной связи используется в генераторах?
2. Сформулируйте условия баланса фаз и амплитуд и объясните их физический смысл.

3. Почему в RC-генераторе с цепью Вина на операционном усилителе цепь Вина подключается к неинвертирующему входу операционного усилителя.
4. Чем определяется амплитуда стационарных колебаний в генераторе?

## Литература

1. *Воронцов Ю. И., Биленко И. А.* Краткое пособие по радиофизике. Методы анализа, задачи, решения. — М.: КДУ, 2007. — 143 с. — ISBN 978-5-98227-279-9.
2. *Кузнецов Ю. И., Логгинов А. С., Митрофанов В. П.* Усилители и RC-генераторы низкой частоты на транзисторах и интегральных схемах (Методическая разработка для практикума по радиоэлектронике и автоматизации физического эксперимента). — М.: Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2009. — 99 с.
3. Основы радиофизики (учебное пособие) / А. А. Белов, Г. В. Белокопытов, И. В. Иванов, Ю. И. Кузнецов, А. С. Логгинов, К. С. Ржевкин; под ред. А. С. Логгинова. — М.: УРСС, 1996. — 256 с. — ISBN 5-88417-086-6.
4. *Трофименко И. Т., Лебедева Е. В., Седлецкая Н. С.* Практикум по радиоэлектронике / под ред. А. П. Сухорукова. — М.: Изд-во МГУ, 1997. — 205 с. — ISBN 5-211-03522-4.