

САРАТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Факультет нелинейных процессов

Учебная лаборатория  
«Прикладная нелинейная динамика в радиофизике»

Выполнена в рамках научно-образовательного центра  
«Нелинейная динамика и биофизика» при Саратовском  
государственному университете (грант REC-006 of  
U.S. Civilian Research and Development Foundation for  
the Independent States of the Former Soviet Union  
(CRDF))

**Е.Н. ЕГОРОВ, А.А. КОРОНОВСКИЙ,  
И.С. РЕМПЕН, А.Е. ХРАМОВ**

## **РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ**

Учебно-методическое пособие

Государственный учебно-научный центр «Колледж»

Саратов 2003

УДК 530.18  
Е 28

Егоров Е.Н., Короновский А.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е.  
Е28 Релаксационный генератор на операционном усилителе. Учебно-методическое  
пособие. Саратов: Изд-во ГосУНЦ «Колледж», 2003. 8 с.

В лабораторной работе «Релаксационный генератор на операционном усилителе»  
изучаются принципы работы операционных усилителей и возможное использование  
операционного усилителя в качестве нелинейного элемента для генератора  
релаксационных колебаний.

Работа предназначена для практических занятий по курсам «Электронные  
приборы», «Нелинейные колебания», «Электроника» для студентов факультета  
нелинейных процессов, физического факультета и факультета компьютерных наук и  
информационных технологий факультета Саратовского университета.

Рецензент:

С.н.с. СО ИРЭ РАН, к.ф.-м.н. В.И. Пономаренко

© Е.Н. Егоров,  
А.А. Короновский,  
И.С. Ремпен,  
А.Е. Храмов,  
2002

Учебное издание

ЕГОРОВ Евгений Николаевич  
КОРОНОВСКИЙ Алексей Александрович  
РЕМПЕН Ирина Сергеевна  
ХРАМОВ Александр Евгеньевич

### **Релаксационный генератор на операционном усилителе**

Учебно-методическое пособие

ГосУНЦ «Колледж», Лицензия ЛР № 020773 от 15.05.98  
Заказ № 301. Подписано к печати 15.04.03.  
Усл. печ. л. 0646(0,5). Уч.-изд. л. 0,45. Тираж 100 экз.

Издательство ГосУНЦ «Колледж»  
410012, Саратов, ул. Астраханская, 83.  
Тел. (845-2)523864

Отпечатано на ризографе издательства ГосУНЦ «Колледж»


## 1. Введение

Неотъемлемой частью почти любого электронного устройства является генератор гармонических или каких-либо других колебаний. Кроме очевидных случаев автономных генераторов (а именно генераторы синусоидальных сигналов, генераторы каких-либо функций, импульсные генераторы) источник регулярных колебаний необходим в любом периодически действующем измерительном приборе, в устройствах, инициирующих измерения или технологические процессы, и вообще в любом приборе, работа которого связана с периодическими состояниями или периодическими колебаниями. Они присутствуют практически везде. Так, например, генераторы колебаний специальной формы используются в цифровых мультиметрах, осциллографах, радиоприемниках, ЭВМ, в любом периферийном устройстве ЭВМ, почти в любом цифровом приборе (счетчики, таймеры, калькуляторы и любые приборы с «многократным отображением») и во множестве других устройств, слишком многочисленных, чтобы их перечислять. Устройство без генератора либо вообще ни на что не способно, либо предназначено для подключения к другому (которое скорее всего содержит генератор). Не будет преувеличением сказать, что генераторы являются таким же необходимым устройством в электронике, как регулируемый источник питания постоянного тока.

В зависимости от конкретного применения генератор может использоваться просто как источник регулярных импульсов («часы» в цифровой системе); от него может потребоваться стабильность и точность (например, опорный интервал времени в частотомере), регулируемость (гетеродин передатчика или приемника) или способность генерировать колебания в точности заданной формы (как например, генератор горизонтальной развертки осциллографа).

Очень простой генератор можно получить следующим образом: будем заряжать конденсатор через резистор (или источник тока), а затем, когда напряжение достигнет некоторого порогового значения, быстро его разрядим и начнем цикл сначала. С другой стороны, это можно сделать с помощью внешней цепи, обеспечивающей изменения полярности тока заряда при достижении некоторого порогового напряжения; следовательно, будут генерироваться колебания треугольной формы, а не пилообразные. Генераторы, построенные на этом принципе, известны под названием «релаксационные генераторы». Они просты и недороги и при умелом проектировании могут обеспечивать удовлетворительную стабильность по частоте.

Раньше для создания релаксационных генераторов применялись устройства с отрицательным сопротивлением, такие, как однопереходные транзисторы или неоновые лампы, теперь предпочитают операционные усилители (ОУ) или специальные интегральные схемы.

 Подробнее об устройстве и принципах работы релаксационного генератора на неоновой лампочке см. [1], глава IV, § 6, стр. 271 – 279.

В настоящей лабораторной работе исследуется классический релаксационный генератор на операционном усилителе. Для четкого понимания принципов его работы необходимо:

- понимать идеологию релаксационных колебаний (она уже была изложена выше);
- иметь представление о принципах работы операционного усилителя.

## 2. Необходимые сведения об операционных усилителях (ОУ).

Операционный усилитель – это дифференциальный усилитель постоянного тока с очень большим коэффициентом усиления и несимметричным входом. Условное обозначение, принятое для всех типов ОУ, показано на рис. 1; входы обозначают (+) и (–), и работают они следующим образом: выходной сигнал изменяется в положительном направлении, когда потенциал на входе (+) становится более положительным, чем потенциал на входе (–), и наоборот. Входные ( $U_+$ ,  $U_-$ ) и выходное ( $U_{\text{вых}}$ ) напряжения ОУ отсчитываются относительно общей точки источников питания – земли. Символы «+» и «–» не означают, что на одном входе потенциал всегда должен быть более положительным, чем на другом; эти символы просто указывают относительную фазу выходного сигнала. Во избежание путаницы лучше называть входы «инвертирующий» и «неинвертирующий», а не вход «минус» и вход «плюс», соответственно. В диапазоне значений  $[-U_{\text{нас}}; +U_{\text{нас}}]$  выходное напряжение операционного усилителя  $U_{\text{вых}}$  прямо пропорционально разности входных напряжений:

$$U_{\text{вых}} = A_D U_D = A_D (U_+ - U_-),$$

где  $A_D$  – дифференциальный коэффициент усиления операционного усилителя (величина  $A_D$  лежит в пределах  $10^4$  до  $10^7$ ),  $U_D$  – разность напряжений на неинвертирующем  $U_+$  и инвертирующем  $U_-$  входах ОУ. Этот диапазон выходного напряжения называется *областью усиления*. В *области насыщения* с ростом  $U_D$  увеличения выходного сигнала не происходит; выходной сигнал равен либо  $-U_{\text{нас}}$ , либо  $+U_{\text{нас}}$ , в зависимости от разности напряжений  $U_D$  на неинвертирующем и инвертирующем входах ОУ. Границы области усиления  $+U_{\text{нас}}$  и  $-U_{\text{нас}}$  отстоят приблизительно на 3 В от соответствующих положительного и отрицательного напряжений питания. При работе операционного усилителя с напряжением питания  $\pm 15$  В типовой диапазон области усиления по выходному напряжению составляет  $\pm 12$  В. Следует также отметить, что на схемах часто не показывают подключение источников питания к ОУ, а также вывод, предназначенный для заземления.

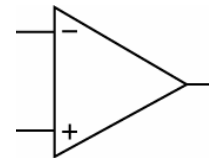


Рис. 1. Условное обозначение операционного усилителя

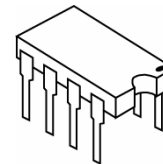


Рис. 2. Внешний вид наиболее распространенных типов операционных усилителей

Типичный операционный усилитель представляет собой крошечный элемент, размещенный в миниатюрном корпусе с двухрядным расположением выводов (см. рис. 2). На рисунке 3 показано соединение с выводами корпуса. Точка на крышке корпуса и выемка на его торце служат для обозначения точки отсчета при нумерации

выводов. В большинстве корпусов электронных схем нумерация выводов осуществляется в направлении против часовой стрелки со стороны крышки корпуса. Выводы «установка нуля» (или «баланс», «регулировка») служат для устранения небольшой асимметрии, возможной в операционном усилителе.

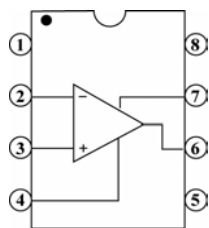


Рис. 3. Соединение ОУ с выводами корпуса (вид сверху). Цифрами обозначены: 1 – установка нуля; 2 – инвертирующий вход; 3 – неинвертирующий вход; 4 – напряжение питания  $U_-$  (обычно  $-15\text{ В}$ ); 5 – установка нуля; 6 – выход; 7 – напряжение питания  $U_+$  (обычно  $+15\text{ В}$ ); 8 – не присоединен

При работе с ОУ следует соблюдать основные предосторожности:

1. Нельзя путать инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ.
2. В схеме операционного усилителя обязательно должна быть предусмотрена цепь обратной связи по постоянному току, в противном случае ОУ обязательно попадет в режим насыщения.
3. Многие ОУ имеют довольно малое предельно допустимое дифференциальное входное напряжение. Максимальная разность напряжений между инвертирующим и неинвертирующим входами может быть ограничена величиной  $5\text{ В}$  для любой полярности напряжения. Если пренебречь этим условием, то возникнут большие входные токи, которые приведут к ухудшению характеристик или даже к разрушению операционного усилителя.

Дополнительно об устройстве и принципах работы операционных усилителей см. [2], т. 1, глава 4, §§ 4.01 – 4.09, стр. 181 – 194; [3], глава 1, §1.3.4, стр. 40 – 42; [4], глава 6, § 6.1, стр.67 – 72.

### 3. Пример использования операционного усилителя

Для того, чтобы представлять себе, как работает операционный усилитель, рассмотрим пример простейшей схемы – инвертирующий усилитель (рис. 4). Затем, опираясь на имеющиеся знания, Вам предстоит самостоятельно разобраться с принципом действия релаксационного генератора на ОУ (см. «Описание экспериментальной установки»).

Для того чтобы понять, как работает обратная связь, представим себе, что на вход подан некоторый уровень напряжения, скажем  $1\text{ В}$ . Для конкретизации допустим, что резистор  $R_1$  имеет сопротивление  $10\text{ кОм}$ , а резистор  $R_2$  –  $100\text{ кОм}$ . Допустим, что напряжение на выходе в начальный момент времени равно  $0\text{ В}$ .

Что произойдет? Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  образуют делитель напряжения, с помощью которого потенциал инвертирующего входа поддерживается равным  $0,91\text{ В}$ . Операционный усилитель фиксирует рассогласование по входам, и напряжение на его выходе начинает уменьшаться. Изменение продолжается до тех пор, пока выходное напряжение не достигнет значения  $-10\text{ В}$ , в этот момент потенциалы входов ОУ станут одинаковыми и равными потенциалу земли. Аналогично, если напряжение на

выходе начнет уменьшаться и дальше и станет более отрицательным, чем  $-10\text{ В}$ , то потенциал на инвертирующем входе станет ниже потенциала земли, в результате выходное напряжение начнет расти.

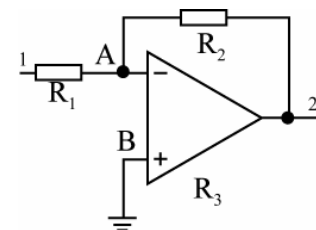


Рис. 4. Схема инвертирующего усилителя на ОУ. 1 – вход, 2 – выход.

### 4. Описание экспериментальной установки

В работе необходимо разобраться с принципом действия релаксационного генератора на операционном усилителе (рис. 5), который состоит из трех резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ , соответственно, конденсатора  $C$  и самого операционного усилителя.

Дополнительно об устройстве и принципах работы релаксационного генератора на ОУ см. [2], т. 1, глава 5, §§ 5.12 – 5.13, стр. 300 – 303; [3], глава 3, §3.6.1, стр. 142 – 147; [4], глава 6, §6.4, стр. 76–77.

После выполнения теоретического задания и отчета преподавателю, необходимо собрать генератор по приведенной схеме (рис. 5). Реализация схемы осуществляется на рабочей плате установки (рис. 6) посредством соединения соответствующих точек соединительными проводами. Все необходимые рабочие элементы (резисторы, конденсатор и ОУ) вмонтированы в плату. Набор соответствующих величин сопротивлений и емкостей определяется преподавателем (см. таблицу). Напряжение питания также уже подведено к ОУ и для его включения необходимо перевести тумблер на панели установки во включенное положение. В качестве измерительных приборов используются осциллограф, а также цифровые вольтметр и амперметр.

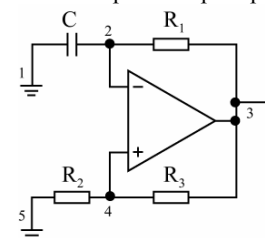


Рис. 5. Принципиальная схема релаксационного генератора на операционном усилителе.

### 5. Меры предосторожности и безопасности

Основным источником опасности в работе являются розетки и провода сети  $220\text{ В}$ , а также части измерительных приборов, скрытые под корпусами, находящиеся при высоких напряжениях. Как в типичном случае работы с электроприборами, при выполнении экспериментальных заданий следует работать одной рукой и не допускать контакта с заземленными предметами. При обнаружении нарушений в корпусах приборов, отсоединения заземляющих проводников или других нарушений установки следует работу прекратить и сообщить о неполадках преподавателю.

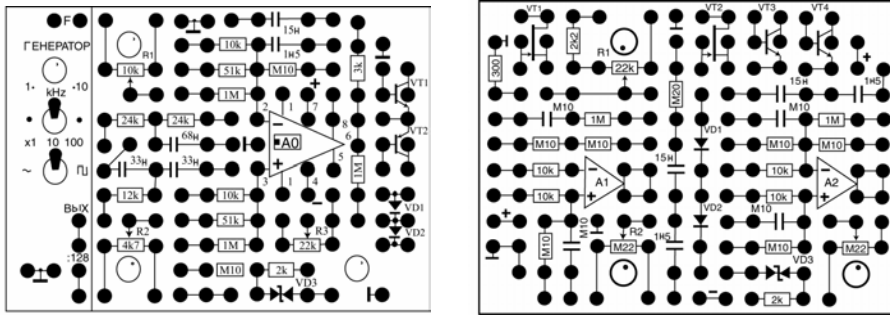


Рис. 6. Платы модулей «усилители» и «операционные усилители» лабораторного комплекса ЛКЭЛ 6

### 6. Контрольные вопросы:

1. Что представляет собой операционный усилитель и каковы принципы его действия?
2. Какие меры предосторожности следует соблюдать при работе с операционными усилителями?
3. Нарисуйте зависимость выходного сигнала ОУ от напряжения подаваемого на инвертирующий вход, если неинвертирующий вход заземлен.
4. Каково устройство и принцип действия инвертирующего усилителя?
5. Каков принцип действия релаксационного генератора на ОУ?
6. Что произойдет с релаксационным генератором, если перепутать инвертирующий и неинвертирующий входы ОУ? Нарисуйте соответствующую временную реализацию.
7. \*Каково устройство релаксационного генератора на неоновой лампочке?

### 7. Теоретическое задание:

(должно быть сделано до выполнения экспериментальной части работы)

1. Постройте зависимость разности потенциалов, снятой в точках схемы (рис. 4) 1–2, 2–3, 1–3, 3–4, 2–4 от времени в размерных единицах с учетом параметров, заданных преподавателем;
2. Рассчитайте параметры схемы релаксационного генератора на операционном усилителе, у которого частота колебаний была бы в два раза больше, чем у схемы с Вашими параметрами.
3. Рассчитайте параметры схемы релаксационного генератора на операционном усилителе, у которого амплитуда колебаний разности потенциалов в точках схемы 1–2 была бы в два раза меньше, чем у схемы с Вашими параметрами.
4. Нарисуйте вид фазового портрета колебаний релаксационного генератора в размерных величинах. С каких точек схемы Вы будете снимать сигнал?
5. Нарисуйте, каким образом Вы будете соединять проводами точки на плате установки (рис. 5) для того, чтобы собрать генератор релаксационных колебаний на ОУ.
6. \*Нарисуйте, каким образом Вы будете соединять проводами точки на плате установки (рис. 5) для того, чтобы выполнить п. 1 Экспериментального задания

### 8. Задание для численного эксперимента.

1. Разберитесь с работой программы Electronics Workbench. Изучите

схемотехнические элементы и опции программы, способы построения различных схем, способы анализа их поведения, измерения основных параметров работы схем.

2. Используя программу, смоделируйте исследуемую вами схему. Получите с помощью осциллографа вид колебаний мультивибратора.
3. Меняя номинальные значения используемых элементов, проследите, какие происходят изменения в работе генератора. Измените параметры схемы соответственно пунктам 2) и 3) «Теоретического задания». Верно ли вы провели расчёты?
4. Изучите, как меняется напряжение и ток с течением времени для элемента схемы, указанного преподавателем.
5. Покажите результаты численного исследования преподавателю.

### 9. Экспериментальное задание:

(Выполняется только после отчета по теоретическому заданию и выполнения численного эксперимента.)

1. \*Снимите зависимость выходного сигнала ОУ от разности потенциалов между неинвертирующим и инвертирующим входами в диапазоне от  $-1$  В до  $1$  В.;
2. Соберите схему генератора релаксационных колебаний на плате установки. Получите разрешение преподавателя или инженера на включение схемы.
3. Снимите зависимость разности потенциалов от времени, снятой в точках 1–2, 2–3, 1–3, 3–4, 2–4 схемы (рис. 4). Сопоставьте полученные результаты с аналогичными данными теоретического задания (п. 2).
4. Получите фазовые портреты колебаний релаксационного генератора. Сопоставьте полученные результаты с аналогичными данными теоретического задания (п. 4).
5. Заменяя в схеме конденсатор  $C$ , определите номинальное значение конденсатора, помеченного на плате (рис. 5) обозначением «1н5»

### 10. Приложение.

Значения параметров для схемы генератора на операционном усилителе.

Таблица

№ задания	$R_1$ , кОм	$R_2$ , кОм	$R_3$ , кОм	$C$ , нФ	$ U_{нас} $ , В
1.	100	10	51	15	11
2.	100	10	51	33	11
3.	100	10	100	15	11
4.	100	10	200	33	11
5.	51	100	1000	68	11
6.	100	51	1000	33	11
7.	100	100	2000	15	11

### 11. Список литературы:

1. А.А.Андронов, А.А.Витт, С.Э.Хайкин. Теория колебаний. М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1959.
2. П. Хоровиц, У. Хилл. Искусство схемотехники. М.: Мир. 1993.
3. А.В. Хохлов. Полупроводниковые усилители и автогенераторы. Саратов. Изд-во Сарат. ун-та. 1997.
4. Х. Тицше, К. Шенк. Полупроводниковая схемотехника.
5. Л.И.Мандельштам. Лекции по колебаниям. Л.: Изд-во АН СССР, 1955