

**Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Физико-технический факультет
Кафедра оптоэлектроники**

Методическое пособие к лабораторной работе

**ГЕНЕРАТОРЫ СИГНАЛОВ
НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ**

Краснодар 2018

Цель работы

Ознакомиться с принципами действия автогенераторов гармонических колебаний и релаксационных генераторов.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Генераторами являются такие схемы, которые производят периодические колебания различных форм, например, прямоугольные, треугольные, пилообразные и синусоидальные. В генераторах обычно применяются различные активные компоненты, лампы или кварцевые резонаторы, а так же пассивные - резисторы, конденсаторы, индуктивности.

Неотъемлемой частью почти любого электронного устройства является генератор каких-либо колебаний. Кроме генераторов испытательных сигналов, выполняемых в виде отдельных изделий, источник регулярных колебаний необходим в любом периодически действующем измерительном приборе, в устройствах, иницирующих измерения или технологические процессы, и вообще в любом приборе, работа которого связана с периодическими состояниями или периодическими колебаниями. Так, например, генераторы колебаний специальной формы используются в цифровых измерительных приборах, осциллографах, радиоприемниках, телевизорах, часах, ЭВМ и множестве других устройств.

В зависимости от конкретного применения генератор может использоваться просто как источник регулярных импульсов (например, синхросигналов в цифровой системе); от него может требоваться стабильность и точность (опорный интервал времени в частотомере), регулируемость (гетеродин радиоприемника) или способность генерировать колебания в точности заданной формы (синусоидальной в аудиотехнике или пилообразной в развертке осциллографа).

Схемотехнически электронный генератор представляет собой усилитель (устройство с отрицательной обратной связью), охваченный дополнительно положительной обратной связью. В качестве усилителя могут быть использованы схемы на дискретных транзисторах, цифровые ИМС, интегральные таймеры, а также операционные усилители. Использование ОУ позволяет построить стабильные генераторы с хорошим воспроизведением формы выходного сигнала.

АВТОГЕНЕРАТОРЫ

Главная особенность колебаний, наблюдаемых в генераторе, состоит в том, что они обусловлены не внешними воздействиями, а свойствами устройства. Такие колебания, возникающие самостоятельно, в отсутствие внешних воздействий, называют автоколебаниями.

Причиной возникновения колебаний служат флуктуации – слабые колебания, происходящие случайным образом. Флуктуации наблюдаются в любой реальной цепи. Колебания, возникающие на входе активного элемента, усиливаются и через цепь обратной связи вновь поступают на вход.

Поскольку обратная связь положительна, сигналы на входе складываются, а выходной сигнал лавинообразно растет. Такой процесс называют самовозбуждением генератора. Частота и амплитуда колебаний определяется набором активных и пассивных компонентов генератора.

На рис. 1 показана блок-схема генератора. Усилитель усиливает входной сигнал в K_U раз. При этом между выходным $\dot{U}_{\text{ВЫХ}}$ и входным $\dot{U}_{\text{ВХ}}$ напряжениями усилителя возникает фазовый сдвиг φ . К выходу усилителя подключена схема частотно-зависимой обратной связи, которая может представлять собой, например, колебательный контур. При этом напряжение, используемое для осуществления обратной связи, составляет $\dot{\beta} \dot{U}_{\text{ВЫХ}}$. Обозначим аргумент комплексного коэффициента звена обратной связи $\dot{\beta}$ символом ψ .

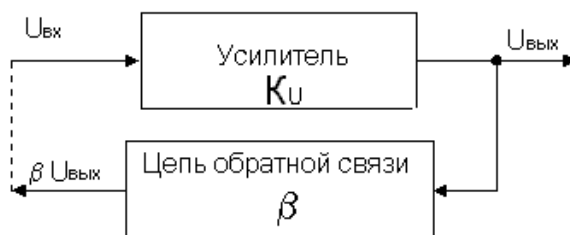


Рис. 1. Блок-схема электронного генератора

Условием генерации стационарных колебаний замкнутой схемой является равенство выходного напряжения схемы обратной связи и входного напряжения усилителя. Это условие записывается следующим образом:

$$\beta \underline{U}_{\text{ВЫХ}} = \underline{U}_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{K_U}$$

Коэффициент петлевого усиления должен, таким образом, равняться

$$\beta K_U = 1. \quad (1)$$

Из последнего комплексного соотношения вытекают два вещественных:

$$|\beta| |K_U| = 1 \quad (2)$$

$$\varphi + \psi = 0, 2\pi, \dots \quad (3)$$

Уравнение 2 называют условием баланса амплитуд, а 3 – условием баланса фаз. Баланс амплитуд означает, что незатухающие колебания в замкнутом контуре могут существовать только тогда, когда усилитель компенсирует потери в схеме обратной связи. Условие баланса фаз означает, что восполнение энергии в системе производится в такт ее собственным колебаниям.

RC-ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Генераторы гармонического сигнала применяются в качестве образцовых или испытательных генераторов во многих схемах. В чистом синусоидальном сигнале присутствует только основная

частота - в идеале в нём нет никаких других гармоник. Таким образом, подавая синусоидальный сигнал на вход какого-нибудь устройства, можно измерить уровень гармоник на его выходе, определив таким образом коэффициент нелинейных искажений. В релаксационных генераторах выходной сигнал формируется из синусоидального сигнала, который суммируется для формирования колебаний специальной формы.

Простейшая схема RC -генератора синусоидальных колебаний на операционном усилителе приведена на рис. 2а.

В качестве звена обратной связи использован полосовой RC -фильтр, частотные характеристики которого приведены на рис. 2б. Здесь по оси абсцисс отложена относительная частота $\Omega = \omega RC$, поэтому средняя частота равна единице (на частоте среза $\omega_c RC$ -фильтра емкостное сопротивление равно активному, а $\omega_c RC = 1$). Фазовый сдвиг на средней частоте $\psi(1)=0$. Следовательно, для выполнения условия баланса фаз выход звена обратной связи должен быть подключен к неинвертирующему входу ОУ. Коэффициент усиления полосового фильтра на средней частоте $|\beta(1)|=1/3$. Для выполнения условия баланса амплитуд ОУ по неинвертирующему входу должен иметь коэффициент усиления $K=3$. Поэтому

$$R_1=2R_2 \quad (4)$$

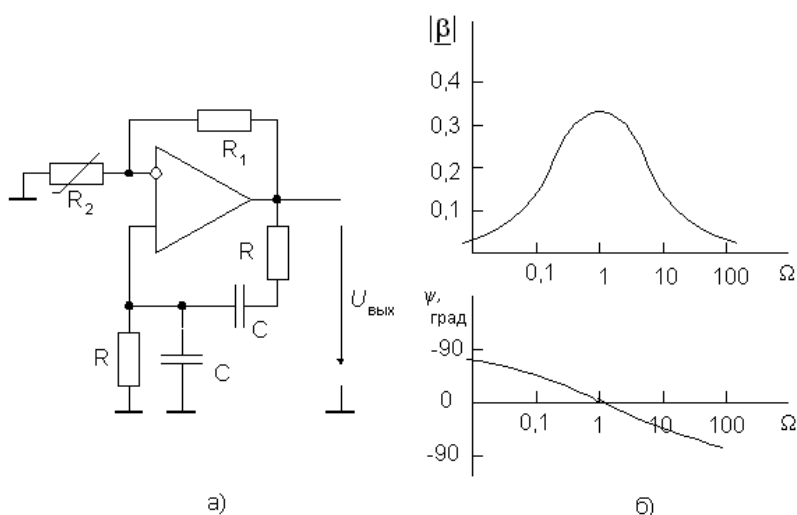


Рис. 2. RC -генератор синусоидальных колебаний

В целом, цепь, подключенная к ОУ (полосовой фильтр и делитель R_1R_2), называется мостом Вина-Робинсона.

При строгом выполнении условия (4) и идеальном ОУ в схеме на рис. 2а будут существовать незатухающие колебания с частотой $f=1/2\omega RC$. Однако амплитуда этих колебаний не будет определена. Кроме того, даже самое незначительное уменьшение R_1 по сравнению с уравнением (4) вызовет затухание колебаний. Напротив, увеличение R_1 по сравнению с (4) приведет к нарастанию амплитуды колебаний вплоть до насыщения усилителя и, как следствие, к появлению заметных нелинейных искажений формы кривой выходного напряжения генератора. Эти обстоятельства требуют использования в составе генератора системы автоматического регулирования амплитуды.

В простейшем случае для этого в качестве резистора R_2 используют нелинейный элемент – микролампу накаливания, динамическое сопротивление которой с ростом амплитуды тока увеличивается.

Кварцевые или керамические резонаторы позволяют создавать гораздо более стабильные генераторы, так как у резонаторов стабильность гораздо выше из-за их нелинейных свойств. Резонаторы применяют в высокочастотных схемах, в низкочастотных схемах резонаторы не используют из-за их больших размеров, веса и стоимости. Операционные усилители обычно не используют совместно с кварцевыми или керамическими резонаторами, так как ОУ имеют низкую полосу пропускания. Опыт показывает, что вместо использования низкочастотных резонаторов для низких частот является более экономически эффективным способ, когда используется высокочастотный кварцевый генератор, выходную частоту которого следует поделить в n раз до необходимой рабочей частоты, а затем отфильтровать выходной сигнал.

LC-ГЕНЕРАТОРЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Схема LC-генератора гармонических колебаний на операционном усилителе показана на рис. 3. Цепь обратной связи образована резистором R и параллельным колебательным контуром. Операционный усилитель и резисторы R_1, R_2 реализуют усилитель с коэффициентом передачи

$$A = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (5)$$

.Частота автоколебаний совпадает с резонансной частотой колебательного контура

$$f_0 = 1/2\pi \sqrt{LC} \quad (6)$$

На резонансной частоте значение $K_U(\omega_0) = 1$ а ФЧХ равна нулю: $\beta(\omega_0) = 0$. При $A > 1$ на выходе цепи будут наблюдаться колебания нарастающей амплитуды. Рост амплитуды колебаний будет продолжаться до тех пор, пока ОУ не перейдет в режим насыщения. После этого на выходе генератора будут наблюдаться гармонические колебания с частотой ω_0 и постоянной амплитудой. Если добротность контура велика, колебания имеют синусоидальную форму.

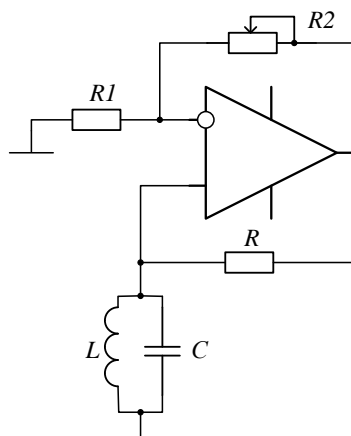


Рис. 3. LC-генератор

Таким образом, для обеспечения самовозбуждения LC -генератора на рис. 3 необходим активный элемент с коэффициентом усиления, несколько большим единицы. В последующем коэффициент усиления снижается за счет нелинейности передаточной характеристики ОУ.

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Релаксация (от лат. *relaxatio* — ослабление, уменьшение) — процесс установления равновесия в электронной схеме. Релаксационными называют генераторы, у которых регулирующий (усилительный) элемент работает в переключательном (релейном) режиме. К ним относят автоколебательный и ждущий мультивибраторы, генераторы пилообразных и треугольных колебаний.

Основные элементы релаксационных генераторов — реактивный накопитель энергии (ёмкостный или индуктивный) и нелинейный элемент с вольтамперной характеристикой, имеющей падающий участок, благодаря чему такой элемент приобретает гистерезисные свойства. Наличие этих свойств обуславливает чередование двух основных стадий работы релаксационных генераторов — стадии запасаения в накопителе энергии от питающего источника постоянного тока (напряжения) и стадии релаксации, когда накопитель освобождается от значительной части энергии. Соизмеримость максимально запасённой и теряемой накопителем энергии — характерная отличительная особенность релаксационных генераторов.

Очень простой генератор можно получить следующим образом: будем заряжать конденсатор через резистор (или источник тока), а затем, когда напряжение достигнет некоторого порогового значения, начнем его разряжать. Далее повторим цикл сначала: 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 ОУ или специальные интегральные схемы таймеров. На рисунке 4 показан классический релаксационный RC -генератор. Работает он просто: допустим, что при начальном включении питания выходной сигнал ОУ выходит на положительное насыщение. Конденсатор начинает заряжаться до напряжения U_+ с постоянной времени, равной RC . Когда напряжение на конденсаторе достигнет половины напряжения источника питания, ОУ переключается в состояние отрицательного насыщения (он включен как триггер Шмитта) и конденсатор начинает разряжаться до U_+ с той же самой постоянной времени. Этот цикл повторяется бесконечно, с периодом $2,2 RC$, который не зависит от напряжения источника питания.

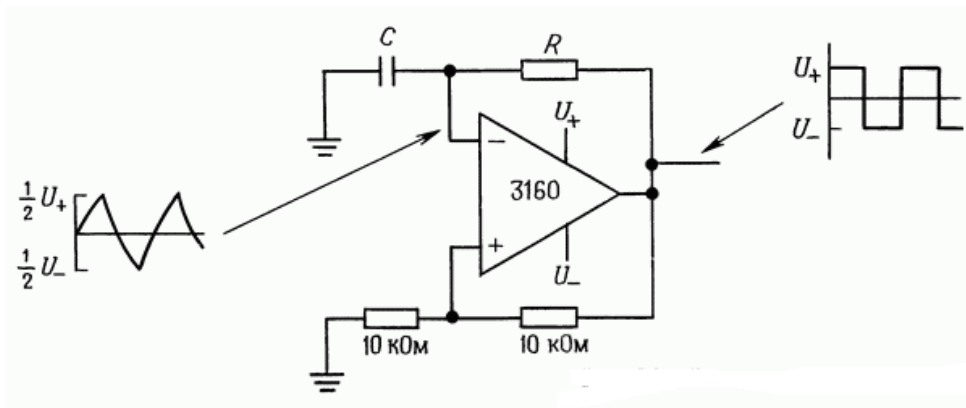


Рисунок 4. Классический релаксационный RC-генератор.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Сложность обеспечения высокой стабильности амплитуды колебаний при минимальных искажениях выходной синусоиды существенно усложняет построение генераторов синусоидальных колебаний и управление ими. Лучшие результаты во многих случаях, особенно на низких и инфранизких частотах, дает применение так называемых *функциональных генераторов*.

Блок-схема простейшего функционального генератора приведена на рис. 5. Он включает генератор прямоугольного и треугольного напряжения и блок формирования синусоидального сигнала.

Блок формирования синусоидального сигнала обычно представляет собой нелинейный функциональный преобразователь, например, на основе аналогового перемножителя. Если частота генератора постоянна, то в качестве блока формирования синусоидального сигнала можно использовать также фильтр нижних частот с полосой пропускания несколько выше частоты требуемого синусоидального сигнала.

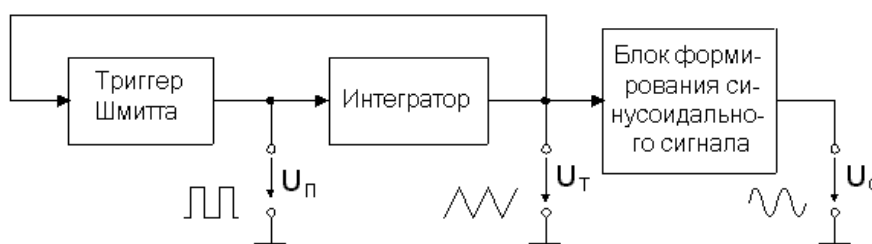


Рис 5. Блок-схема функционального генератора

Блок, состоящий из генератора прямоугольного и треугольного напряжения, можно рассматривать как генератор линейно-изменяющегося напряжения.

ГЕНЕРАТОРЫ ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ НАПРЯЖЕНИЯ (ГЛИН)

ГЛИН представляют собой электронные устройства, напряжение на выходе которых в течение некоторого времени изменяется по линейному закону. Часто такое напряжение меняется периодически.

Если напряжение изменяется от меньшего значения к большему (по абсолютному значению), то его называют *линейно нарастающим*, если от большего значения к меньшему, то - *линейно падающим*. Периодически изменяющееся напряжение называют *пилообразным*. Подобные генераторы широко *применяются* в аппаратуре связи, телевидении, радиолокации. Наиболее часто их используют для создания временной развертки луча в электронно-лучевых трубках осциллографов, телевизоров и т. п.

Другой важной областью применения пилообразного напряжения является преобразование напряжения во временной интервал в устройствах фазоимпульсной модуляции сигналов, при сравнении токов и напряжений и при замене напряжения цифровым кодом и т. п.

В практически используемых схемах генераторов линейно изменяющегося напряжения заложен принцип заряда и разряда конденсатора через резистор при подаче на вход перепада напряжения.

Схемные варианты, реализующие этот принцип, различаются лишь методами улучшения параметров формируемого напряжения.

Как показано на рис. 6, генератор линейно-изменяющегося напряжения состоит из триггера Шмитта и интегратора, образующих замкнутый контур. В схеме генератора (рис. 6) формируется напряжение не только прямоугольной формы, но и формы, близкой к треугольной (на конденсаторе). Временязадающая RC -цепь мультивибратора выполняет приближенное интегрирование выходных прямоугольных колебаний. Заменив эту цепь интегратором на ОУ, получим генератор, на одном из выходов которого формируются прямоугольные, а на другом – треугольные колебания (рис. 6). Здесь на усилителе ОУ1 выполнен неинвертирующий триггер Шмитта, а на ОУ2 – интегратор.

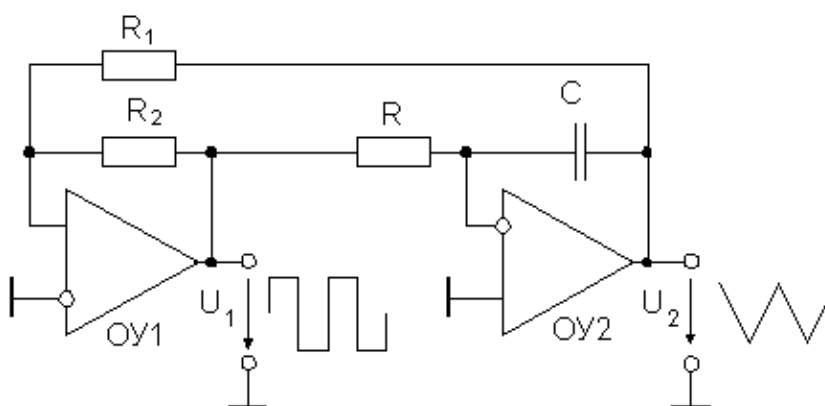


Рис. 6. Схема генератора прямоугольных и треугольных колебаний

Интегратор интегрирует постоянное напряжение, имеющееся на выходе триггера Шмитта. Когда выходное напряжение интегратора достигает порога срабатывания триггера Шмитта,

напряжение на его выходе U_1 скачком меняет свой знак. Вследствие этого напряжение на выходе интегратора начинает изменяться в противоположную сторону, пока не достигнет другого порога срабатывания триггера Шмитта. Изменяя постоянную интегрирования RC , можно перестраивать частоту формируемого напряжения в широком диапазоне. Амплитуда треугольного напряжения U_2 зависит только от установки уровня срабатывания триггера Шмитта $U_{п}$, который для данной схемы включения триггера составляет $U_{num}R_1/R_2$ (U_{num} – напряжение питания ОУ).

Период колебаний генератора равен удвоенному времени, которое необходимо интегратору, чтобы его выходное напряжение изменилось от $-U_{п}$ до $+U_{п}$. Отсюда следует, что

$$T = 4RC \frac{R_1}{R_2} \quad (7)$$

Таким образом, частота формируемого напряжения не зависит от уровня выходного напряжения операционного усилителя.

ГЕНЕРАТОР, УПРАВЛЯЕМЫЙ НАПРЯЖЕНИЕМ

Генератор, управляемый напряжением (ГУН) — электронный генератор, с помощью которого осуществляют управление частотой колебаний посредством напряжения. Частота колебаний зависит от подаваемого напряжения, причём ГУН может быть запитан от модулированных сигналов, что дает возможность реализовать фазовую или частотную модуляцию; для ГУН с цифровым выходом возможно генерировать частоту следования импульсов или применить широтно-импульсную модуляцию (ШИМ). ГУН широко применяются в различных радиоэлектронных системах — аппаратуре радиосвязи, автоматического управления, электромзыкальных инструментах и др.

ГУНы можно разделить на два класса в зависимости от выходного сигнала:

- гармонические осцилляторы;
- релаксационные генераторы.

Гармонические осцилляторы создают сигнал синусоидальной формы. В их состав входят усилитель и резонансный контур (контур необходим для отправки сигнала обратно на вход). Колебания происходят на частоте настройки, где положительное усиление создается вокруг петли.

Релаксационные генераторы генерируют сигналы пилообразной или треугольной формы. Они часто применяются в монолитных интегральных схемах (ИС), и могут обеспечить широкий диапазон частот.

У генераторов, управляемых напряжением, принято выделять следующие характеристики:

- Диапазон частот перестройки ГУН, определяется как диапазон изменения частоты сигнала от минимальной (f_{min}) до максимальной (f_{max}) на выходе генератора;
- Крутизна перестройки ГУН по частоте. Это крутизна характеристики перестройки по частоте от напряжения перестройки (выражается в Гц/В), показывающая, насколько изменится выходная частота при изменении управляющего напряжения на единицу;
- Характеристика перестройки ГУН по частоте. Это представленная в графическом виде

зависимость частоты на выходе ГУН от управляющего напряжения;

Схема генератора, управляемого напряжением, изображённого на рисунке 7, позволяет получить частоту сигнала на выходе, зависящую от входного напряжения.

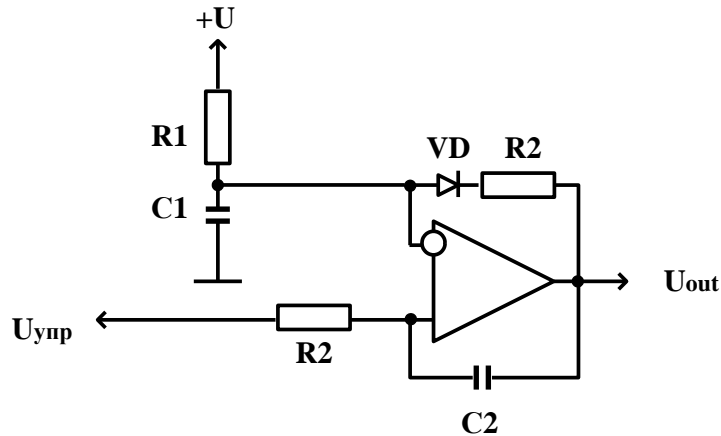


Рис. 7. Принципиальная схема генератора, управляемого напряжением.

Принцип действия этого генератора основан на том, что конденсатор $C1$ заряжается через резистор $R1$ до заданного напряжения, затем происходит его разряд через диод $D1$, и далее процесс повторяется. Процессом разряда управляет компаратор-одновибратор, реализованный на операционном усилителе $DA1$. Чем меньше напряжение, до которого заряжается конденсатор, тем больше частота на выходе генератора.

Рассмотрим работу компаратора-одновибратора. В исходных условиях конденсатор $C2$ заряжен, а $C1$ разряжен. Поскольку напряжение на инвертирующем входе операционного усилителя $DA1$ меньше, чем на его прямом входе, то на выходе $DA1$ присутствует напряжение, близкое к напряжению питания. Как только напряжение на конденсаторе $C1$ станет больше, чем напряжение на прямом входе усилителя $DA1$, на выходе компаратора-одновибратора появится напряжение, близкое к нулю. Поскольку конденсатор $C2$ заряжен, то через этот конденсатор на прямой вход усилителя потечёт ток обратной полярности, что приведёт к появлению отрицательного напряжения на прямом входе усилителя $DA1$, и это продлится до тех пор, пока конденсатор $C2$ не перезарядится. То есть конденсатор $C2$ образует временную положительную обратную связь, которая превращает усилитель в триггер Шмитта, и за время действия этой ОС частотообразующий конденсатор $C1$ успевает почти полностью разрядиться через диод $D1$.

Применение в схеме ГУН компаратора-одновибратора позволяет увеличить диапазон управляющих напряжений, и кроме того амплитуда выходного сигнала остаётся неизменной (рис.8).

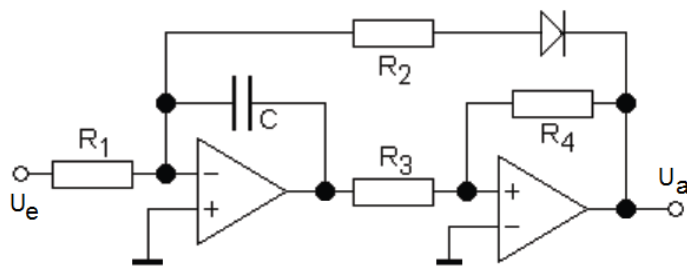


Рис. 8. Простая схема генератора, построенная на двух операционных усилителях. Если $R1 \ll R2$, то частота U_a достаточно точно пропорциональна U_e

Пример зависимости частоты на выходе генератора от управляющего напряжения показан на рисунке 9.

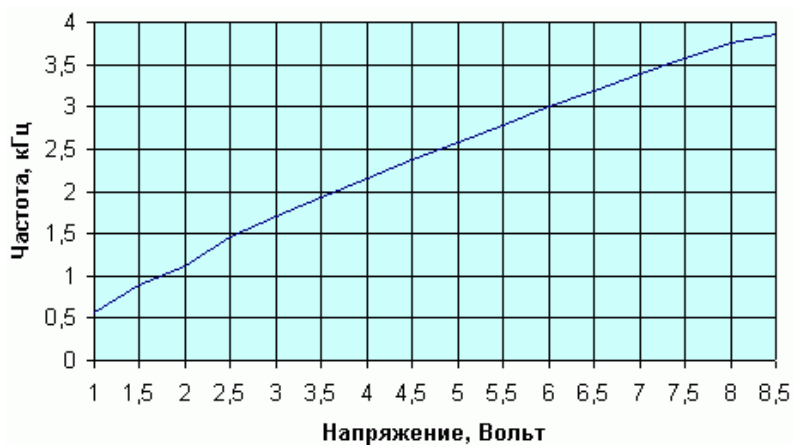


Рис. 9. Зависимость частоты на выходе генератора от управляющего напряжения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

ВНИМАНИЕ!!! Питание операционного усилителя (+/- 15 В) **ВСЕГДА ВКЛЮЧАЕТСЯ ПЕРВЫМ А ВЫКЛЮЧАЕТСЯ ПОСЛЕДНИМ!** Несоблюдение этого правила ведет к выходу ОУ из строя.

Под руководством преподавателя соберите и исследуйте работу следующих схем:

1. **RC-генератор синусоидальных колебаний с мостом Вина-Робинсона.**
2. **LC-генератор**
3. **Релаксационный RC-генератор**
4. **Функциональный генератор прямоугольного и треугольного напряжения.**
5. **Генератор, управляемый напряжением.**

Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены генераторы?
2. Каким типом обратной связи охвачен генератор?
3. Каково условие возбуждения генератора?
4. Какие генераторы называются автогенераторами гармонических колебаний? Где они применяются?
5. Нарисуйте схему генератора гармонических колебаний на основе моста Вина-Робинсона, поясните её работу.
6. Нарисуйте схему LC- генератора гармонических колебаний, поясните её работу.
7. Как определяется частота колебаний LC- генератора?
8. Каковы принципы работы релаксационного генератора?
9. Какие генераторы называются функциональными? Где они применяются?
10. Нарисуйте схему функционального генератора, поясните её работу.
11. Как определяется частота функционального генератора?
12. Какие генераторы называются генераторами, управляемыми напряжением? Где они применяются?
13. Нарисуйте схему ГУН, поясните её работу.
14. Как определяется частота ГУН?

Основная литература

1. Кузовкин В.А., Филатов В. В. Электротехника и электроника : учебник для ба-калавров : учебное пособие для студентов вузов. М.: Юрайт, 2013.
2. Шишкин Г.Г. Электроника: учебник для студентов вузов. М. : Дрофа, 2009.

Дополнительная литература

1. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. М.: «Мир». 1983.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. М.: «Мир». 1982.
3. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.Л., Гуров А.И. Аналоговая и цифровая электроника: Полный курс. Учебник для высших учебных заведений. М: Горячая Линия - Телеком, - 2005 г., 768с
4. Гутников В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. Ленинград.: Энергоатомиздат. 1988.