



**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**"Самарский государственный технический университет"**

---

Кафедра "Информационно-измерительная техника"

# **АНАЛОГОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА**

Методические указания для курсового проектирования

Самара  
Самарский государственный технический университет  
2016

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Аналоговые измерительные устройства (АИУ) используются во всех областях науки и техники и имеют разнообразную номенклатуру. Особый интерес из всех разновидностей АИУ имеют электронные устройства и автоматические средства измерения.

Материал методических указаний предназначен для отработки навыков проектирования АИУ, разработки их электрических схем, определения погрешностей и других метрологических характеристик.

## **ВВЕДЕНИЕ**

В современных АИУ широкое применение находят узлы электроники и микроэлектроники. Они позволяют существенно увеличить чувствительность устройств, их внутреннее сопротивление и частотный диапазон. Поэтому основная тематика курсового проектирования по курсу АИУ посвящена разработке электронных устройств, включая использование схем повышения точности измерения, разработке электронных схем и автоматизации электронных устройств.

Студентам предлагается спроектировать то или иное АИУ с заданными характеристиками.

Примерные тематики курсового проекта:

1. Спроектировать электронный вольтметр действующих значений для диапазона напряжений 0-1 В. Погрешность не более 0,5 %
2. Спроектировать электронный вольтметр действующих значений для диапазона напряжений 0-100 В. Погрешность не более 0,5 %
3. Спроектировать электронный вольтметр действующих значений для диапазона напряжений 0-1000 В. Погрешность не более 0,5 %
4. Спроектировать фазочувствительный вольтметр с отсчетом значений  $U, U_x, U_y, \cos$ . Погрешность измерения  $U, U_x, U_y$  не более 1%, отсчет угла с погрешностью угла 0,5 %
5. Спроектировать электронный омметр для диапазона 0-10 Ом. Номинальное напряжение выходного прибора 10 В.
6. Спроектировать электронный омметр для диапазона 0-100 Ом. Номинальное напряжение выходного прибора 10 В.
7. Спроектировать пиковый вольтметр компенсационный автоматический со статической характеристикой. Действующее значение напряжения 0-5 В.
8. Спроектировать пиковый вольтметр компенсационный автоматический с астатической характеристикой. Действующее значение напряжения 0-5 В.
9. Спроектировать электронный частотомер для диапазона 0-100 Гц.
10. Спроектировать электронный частотомер для диапазона 0-1000 Гц.
11. Спроектировать электронный частотомер для диапазона 0-10000 Гц.
12. Спроектировать измеритель глубины амплитудной модуляции. Диапазон 100 кГц – 1 МГц. Погрешность 2%.
13. Спроектировать автоматический измеритель добротности  $Q$  астатического типа,  $Q = 10 - 100$ . Диапазон частот 100 кГц – 2 МГц.
14. Спроектировать преобразователь сопротивления напряжение мостового типа с уменьшенным влиянием сопротивления соединительных проводов. Сопротивление изменяется 0 – 20 кОм. Входное напряжение 0 -5 В.
15. Разработать генератор синусоидальных колебаний с регулировкой амплитуды выходного напряжения. Частота генерации 400 Гц. Значение амплитуды 0 – 5 В.
16. Разработать генератор прямоугольных импульсов. Частота генерации 300 кГц, амплитуда - 5 В. Обеспечить регулировку скважности. Длительность фронта не более 1 мкс. Диапазон температур от -20 до +40 °С
17. Спроектировать измеритель малых емкостей в диапазоне 0 -5 пФ. Погрешность 5 %
18. Спроектировать измеритель малых емкостей в диапазоне 0 -10 пФ. Погрешность 5 %
19. Спроектировать ГЛИН с коэффициентом нелинейности не более 0,01 %. Амплитуда напряжения 5В.
20. Спроектировать измеритель индуктивности в диапазоне от 0 до 0,01 Гн. Погрешность 0,5 %.

Выполнение курсового проекта по АИУ можно разбить на ряд типичных этапов, причем при выполнении могут встретиться не все этапы, тем не менее, эти этапы являются достаточно общими в профессии инженера – разработчика и инженера – исследователя:

- Обзор существующих методов и схем, предназначенных для решения задачи, поставленной в курсовом проекте.  
Этот этап представляет собой изучение по литературным источникам различных схем и методов, которые могли бы быть использованы для расчета в курсовом проекте. Студенты, ориентируясь на полученное задание, производят сравнительный анализ существующих схем, оценивая их с точки зрения их применения. При этом студенты должны показать глубокое знание литературных источников, умение в них ориентироваться, пользоваться не только основными учебниками, но и специальной литературой: монографиями и статьями в научно-технических журналах.
- Выбор схемы.

Этот этап предполагает на основе проведенного анализа выбрать функциональную схему, которая наилучшим образом решает поставленную в курсовом проекте задачу. Если оказывается, что готовые схемы выбрать не удастся, студенты должны разработать ее сами.

- Третий этап проектирования состоит в разработке принципиальной схемы, соответствующей полученной в результате выполнения предыдущего этапа проектирования функциональной схемы. При этом, если элементная база для реализации не задана, то следует изучить ее функциональный состав, рекомендации по применению и примеры использования.

## **ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТА ПО ТЕМЕ- ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ГЕНЕРАТОРА ТРЕУГОЛЬ- НЫХ ИМПУЛЬСОВ**

Разработать схему генератора треугольных импульсов с частотой  $f_x=300\text{Гц}$  и выходным напряжением  $U_{\text{вых}}=0\div 5\text{В}$ .

## РЕФЕРАТ

Курсовой проект содержит 16 страниц, 4 рисунка, 1 таблицу, 6 источников, 2 приложения.

ГЕНЕРАТОР ТРЕУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ, РЕЛАКСАЦИОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, ТРИГГЕР ШМИТТА, ИНТЕГРАТОР, СТАБИЛИТРОН, ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ.

Курсовой проект содержит основы реализации генераторов треугольных импульсов. Проведено исследование заданных параметров, описаны возможные способы реализации устройства, разработана наиболее подходящая схема с выбором основных элементов на основании расчетов.

## ВВЕДЕНИЕ

Генератор сигналов — это устройство, позволяющее получать сигнал определённой природы (электрический, акустический и т.д.), имеющий заданные характеристики (форму, энергетические или статистические характеристики и т. д.). Генераторы широко используются для преобразования сигналов, для измерений и в других областях. Состоит из источника (устройства с самовозбуждением, например, усилителя, охваченного цепью положительной обратной связи) и формирователя (например, электрического фильтра) [1].

Различные виды и параметры схем определяют не только такие характеристики, как частота и амплитуда выходного сигнала, но и саму его форму.

Широко применяют генераторы пилообразной или треугольной формы. Они используются, в том числе, и для воспроизведения времени.

Для достижения формы сигнала, близкой к треугольной, зачастую используются интеграторы в составе схем генератора. Такой подход обеспечивает простоту конструкции и расчетов, а также возможность регулировки частоты выходного сигнала путем введения элементов сопротивления или емкости с переменным номиналом в соответствующие цепи схемы.

Довольно простым способом реализации генератора прямоугольных импульсов можно считать релаксационные генераторы.

Данный проект предназначен для разработки генератора треугольных импульсов, с подбором схемы, наилучшим образом отвечающей начальным условиям, а также расчетом её компонентов.

# 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ТРЕУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Релаксационный генератор — это импульсный генератор, источник электрических негармонических колебаний, часто с широким спектром. Это такой генератор колебаний, в котором активный элемент работает в ключевом (релейном) режиме — включён/выключен. К характерным особенностям релаксационных генераторов относят невозможность работать при отключенном источнике энергии, тот факт, что они являются только автогенераторами, при этом нелинейными системами, для описания требуют применения нелинейной теории колебаний.

К основным элементам релаксационного генератора относятся реактивный накопитель энергии (емкостный или индуктивный) — нелинейный элемент с вольт-амперной характеристикой, имеющей падающий участок, благодаря чему такой элемент приобретает гистерезисные свойства. Эти свойства обуславливают чередование двух основных стадий работы релаксационного генератора — стадии запасаения в накопителе энергии от питающего источника постоянного тока (напряжения) и стадии релаксации, когда накопитель освобождается от значительной части энергии (она рассеивается в нелинейном элементе и активных элементах релаксационного генератора, например в резисторах).

Максимально запасенная энергия и отдаваемая накопителем — соизмеримы. Это характерная отличительная особенность релаксационного генератора. В качестве нелинейного элемента в релаксационных генераторах применяют газоразрядные приборы (тиратроны, неоновые лампы), электронные лампы, транзисторы, тиристоры, туннельные диоды и другие либо усилительные каскады (транзисторный, ламповый) с положительной, обратной связью.

Наиболее распространенные релаксационные генераторы — это мультивибраторы, блокинг-генераторы, фантастроны. Типичные режимы работы релаксационных генераторов — автоколебательные, при которых период релаксационных колебаний определяется параметрами релаксационных генераторов. Из-за невысокой стабильности частоты (а, следовательно, и периода) колебаний такие генераторы стараются синхронизировать от внешнего источника стабильных колебаний. В релаксационных генераторах используется также ждущий режим работы, при котором релаксационный генератор срабатывает в результате воздействия сигнала извне. Применяют релаксационные генераторы в устройствах импульсной техники, в частности телевизионной, радиолокационной, радиоизмерительной аппаратуре.

Принцип работы релаксационного генератора основан на том, что конденсатор заряжается до определенного напряжения через резистор. При достижении нужного напряжения открывается управляющий элемент. Конденсатор разряжается через другой резистор до напряжения, при котором управляющий элемент закрывается. Так напряжение на конденсаторе нарастает по экспоненциальному закону, затем убывает по экспоненциальному закону.

Наиболее простым релаксационным генератором можно назвать мультивибратор.

Мультивибратор на ОУ

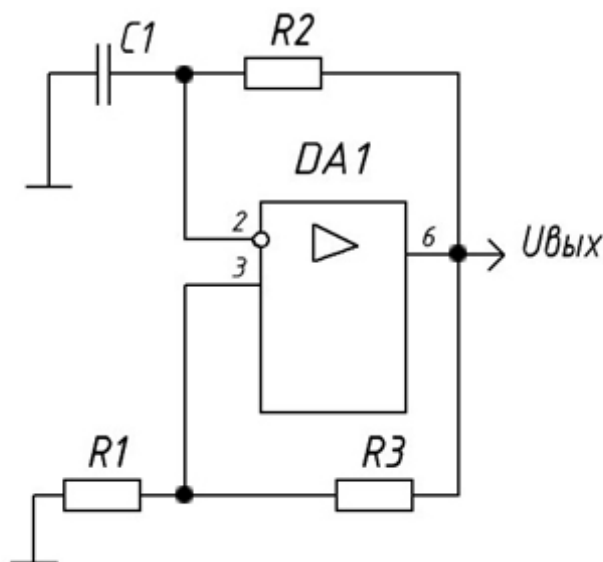


Рис 1.1

Схемы мультивибраторов на основе ОУ могут быть различными. Наиболее простые из них обычно строят, охватывая ОУ цепями ПОС и ООС, причем ПОС по своему действию во времени должна быть опережающей по отношению к ООС. Тогда цепь ПОС обеспечивает лавинообразный переход мультивибратора из одного состояния в другое, а цепь ООС (совместно с цепью ПОС) ограничивает время пребывания устройства в каждом из состояний.

На рис. 1.1 и 1.3 показаны схемы простейших мультивибраторов на основе ОУ. В мультивибраторе рис. 1.1 цепь ПОС выполнена на основе резистивного делителя R3, R4, а цепь ООС содержит пассивный интегратор R1, C1. Если уровни ограничения выходного напряжения ОУ одинаковы по модулю и равны  $+U_{огр}$  и  $-U_{огр}$ , а  $\beta_n = R3/(R3 + R4)$  — коэффициент ПОС, то можно определить полупериод колебаний  $T/2$  как время перезаряда конденсатора C1 под воздействием напряжения  $U_{огр}$  через резистор R1 от уровня  $-\beta_n \cdot U_{огр}$  до уровня  $+\beta_n U_{огр}$ :

$$-\beta_n U_{огр} e^{-\frac{T}{2\tau}} + U_{огр} \left(1 - e^{-\frac{T}{2\tau}}\right) = \beta_n U_{огр}. \quad (1.1)$$



Временные диаграммы напряжений на инвертирующем (e-), неинвертирующем (e+) входах и выходе (Uвых) ОУ для данного мультивибратора показаны на рис. 1.2.



Рис 1.2

В мультивибраторе по схеме рис. 1.3 цепь ПОС выполнена дифференцирующей (C1, R4, R3), а цепь ООС образована резистивным делителем R2, R1. Обозначим  $\beta_n = R3/(R3+R4)$ ,  $\beta_0 = R1/(R1+R2)$ . После перехода выходного напряжения мультивибратора, например, с уровня  $-U_{огр}$  на уровень  $+U_{огр}$ , возникающий на Н-входе скачок напряжения  $2 \cdot \beta_n \cdot U_{огр}$  затем уменьшается по экспоненте. Полупериод колебаний  $T/2$  определяется временем, в течение которого напряжение на Н-входе уменьшается до напряжения на И-входе [2].

Мультивибратор по схеме рис. 1.3 работоспособен лишь при  $\beta_n > \beta_0$ . иначе говоря, при  $R3/R4 > R1/R2$ .

Мультивибратор с емкостью в цепи положительной обратной связи

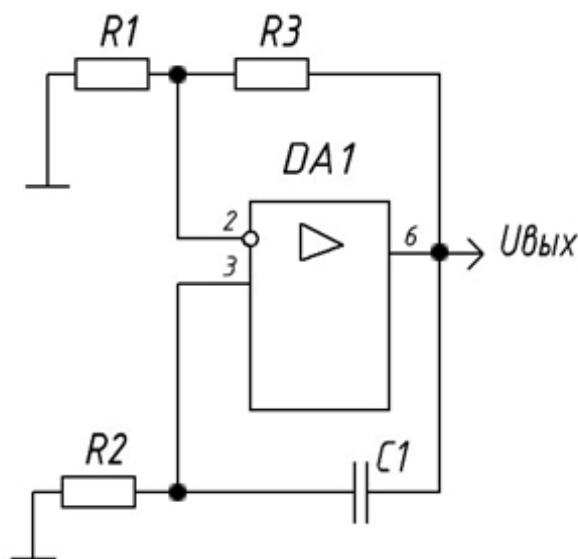


Рис 1.3

Мультивибратор, подобный показанным на рис. 1.1 и 1.3 может быть построен и при сочетании дифференцирующей цепи в ПОС с интегрирующей цепью в ООС.

Находят применение также более сложные релаксационные генераторы на основе ОУ. Для получения треугольного выходного напряжения можно, например, образовать замкнутый контур из интегратора и формирователя типа триггера Шмитта (рис. 1.4). На выходе интегратора здесь формируется напряжение треугольной формы с периодом

$$T = 4 \cdot C1 \cdot R1 \cdot \frac{R2}{R3}, \quad (1.2)$$

и с амплитудой, равной

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СТ}} \cdot \frac{R2}{R3}, \quad (1.3)$$

где  $U_{\text{СТ}}$ —напряжение стабилизации двустороннего стабилитрона VD1. На стабилитроне получаем напряжение прямоугольной формы с амплитудой  $U_{\text{СТ}}$ .

Релаксационный генератор напряжения треугольной формы

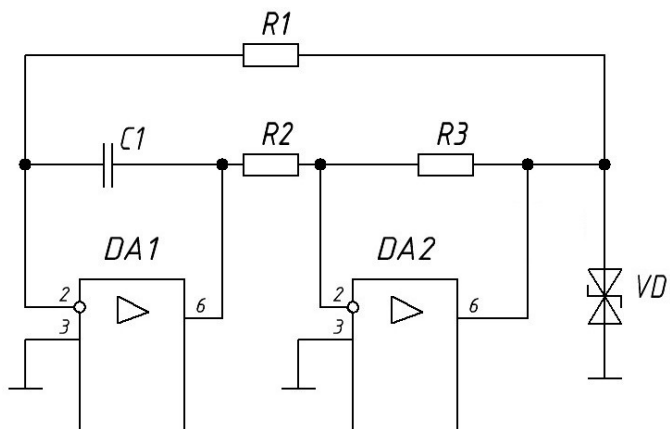


Рис 1.4

В качестве управляющих элементов в релаксационных генераторах могут применяться самые разные радиоэлектронные компоненты: тиратроны, тринисторы, динисторы, однопереходные транзисторы, электронные микросхемы. Но мы остановимся на релаксационных генераторах динисторах. Если есть желание получить релаксационный генератор на биполярных транзисторах, то можно применить вместо динистора его транзисторный аналог.

Применение в релаксационных генераторах транзисторных аналогов динистора является типичным, так как для расчета и точной работы этого генератора необходимы строго определенные параметры динистора. Некоторые из этих параметров у промышленных динисторов либо имеют большой технологический разброс, либо вообще не нормируются. А сделать аналог со строго заданными параметрами не составляет труда [3].

## 2 МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА

На данном этапе производится описание математической модели генератора треугольных импульсов, описывающей его параметры.

Взяв схему соответственно рис 1.4, но с измененной нумерацией элементов, определять частоту  $f_x$  выходного сигнала через период будет выражение, подобное (1.2):

$$T = 4 \cdot C1 \cdot R4 \cdot \frac{R3}{R1}, \quad (2.1)$$

где  $T$  – период выходного сигнала,  $C1$  – емкость в цепи обратной связи интегратора на DA2,  $R1$  – сопротивление в обратной связи триггера Шмитта на DA1,  $R3$  – сопротивление в контуре обратной связи выхода интегратора на DA2 ко входу триггера Шмитта на DA1, и  $R4$  – входное сопротивление интегратора на DA2.

Так как  $f_x = 1/T$ :

$$f_x = \frac{1}{4 \cdot C1 \cdot R3 \cdot \frac{R2}{R1}}. \quad (2.2)$$

Другим выражением, описывающим параметры схемы будет вариация (1.3):

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СТ}} \cdot \frac{R3}{R1}, \quad (2.3)$$

где  $U_{\text{ВЫХ}}$  – амплитуда выходного напряжение,  $U_{\text{СТ}}$  – напряжение стабилизации стабилитрона VD1. При  $U_{\text{СТ}}=10\text{В}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}=5\text{В}$  (для выполнения начального условия):

$$5 = 10 \cdot \frac{R3}{R1}, \quad (2.4)$$

$$0,5 = \frac{R3}{R1}, \quad (2.5)$$

откуда видим, что  $R1$  должно быть больше  $R3$  в два раза.

### 3 РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА ТРЕУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Из всех возможных была выбрана схема релаксационного генератора, состоящая из двух блоков на операционных усилителях – триггера Шмитта на DA1 и интегратора на DA2.

R2 и R5 используются в схеме для компенсации смещения нуля в операционных усилителях DA1 и DA2. Выбираем для них номинал 10кОм, R2=R5=10кОм.

Если подставить в (2.2) допустимые значения номиналов R1=10кОм, R3=20кОм, R4=100кОм, а также, согласно начальному условию,  $f_x=300$ Гц, получим выражение для определения C1:

$$300 = \frac{1}{4 \cdot C1 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}} \quad (2.6)$$

Выражаем C1:

$$C1 = \frac{1}{4 \cdot 300 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3}}, \quad (2.7)$$

откуда C1=4,17нФ.

VD1 в схеме - это двуханодный стабилитрон. Он используется вместе с триггером Шмитта для формирования входного напряжения на интегратор. Возьмем в качестве VD1 стабилитрон марки КС210Б с напряжением стабилизации 10В.

DA1 и DA2 представляют собой интегральные операционные усилители, используемые для измерения малых разностей напряжения. Они должны, иметь дифференциальный вход, высокое значение коэффициента усиления, низкий сдвиг нулевого уровня и очень большой (обычно больше 80 дБ) коэффициент ослабления синфазного сигнала [5].

В качестве операционных усилителей берем К140УД7, основываясь на параметрах данной микросхемы, приведенной в справочных материалах [6].

Справочные характеристики операционного усилителя К140УД7 приведены в таблице 3.1.

Параметры операционного усилителя К140УД7

Таблица 3.1

Параметр	Количественная оценка
Напряжение питания номинальное, В	2×15
Потребляемый ток, мА	2,8
Коэффициент усиления	$5 \times 10^4$
Напряжение смещения нуля, мВ	9
Входной ток, нА	200
Максимальное выходное напряжение, В	10,5
Входное сопротивление, МОм	0,4
Коэффициент ослабления синфазного сигнала, дБ	70
Скорость нарастания напряжения, В/мкс	0,3
Температурный коэффициент напряжения смещения нуля, мкВ/°С	10
Максимальное напряжение синфазного сигнала, В	12

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данного курсового проекта представлена разработка схемы частотомера для заданного частотного диапазона. По своим техническим характеристикам и назначению система полностью соответствует требованиям, изложенным в техническом задании.

Треугольный сигнал применяется, к примеру, для получения синусоиды путем, сначала, ограничения по амплитуде (формируя трапецию), потом фильтрации гармоники нужной частоты. Трапециевидное напряжение, полученное из треугольного нередко применяется в качестве образца для формирования модифицированной синусоиды на выходе силовых преобразователей напряжения (инверторов). Почти все нагрузки, рассчитанные на синусоиду, прекрасно работают и с трапецией.

В ходе работы получены практические навыки в расчетах и анализе электрических схем.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фрумкин Г.Д. Расчет и конструирование радиоаппаратуры:  
Учебник для радиотехнич. спец. Техникумов. М.:Высш. Шк.,1989. -463 с.: ил.
2. Измерения в электронике. Справочник под редакцией В.А.  
Кузнецова. - М. Энергоатомиздат, 1987.
3. Хоровиц, П., Хилл, У. Искусство схемотехники. / Хоровиц П.,  
Хилл У. — М.: Мир, 1998.
4. Титце У. Полупроводниковая схемотехника /Титце У., Шенк К. —  
М.: ДМК Пресс, 2008.
5. Справочник по электроизмерительным приборам; Под ред. К. К.  
Илюнина — Л.: Энергоатомиздат, 1983
6. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных  
устройствах. / Гутников В.С. - М.: Энергоатомиздат, 1988.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валенко В.С. Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств. – М.: Додэка – 21, 2001. – 366 с.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. Изд-во 2-е. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000. – 488 с.
3. Справочник по полупроводниковым диодам и транзисторам / Под ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергия, 1970. – 744 с.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. Изд. 11-е. – М.: УИЦ «Гардарики», 2006. – 701 с.
5. Ланге П.К., Васильчук А.В. Анализ характеристик простейших цепей: Учеб. пособие к самостоятельной работе и практическим занятиям; ч.1. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2007. – 71 с.