

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

А. О. НОВИКОВ

ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА НА ОПЕРАЦИОННОМ УСИЛИТЕЛЕ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве методических указаний для обучающихся Самарского университета по основным образовательным программам высшего образования по направлению подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника и специальности 10.05.03 Информационная безопасность автоматизированных систем

Составитель *А. О. Новиков*

САМАРА
Издательство Самарского университета
2024

© Самарский университет, 2024

УДК 621.38(075)
ББК 385я7
Г340

Рецензент канд. техн. наук, доц. В. В. Семенов

Г340 **Генератор синусоидального сигнала на операционном усилителе:** методические указания / сост. *А. О. Новиков*; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Самарский университет. – Самара: Издательство Самарского университета, 2024. – 1 CD-ROM (0,8 Мб). – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный.

Методические указания направлены на получение обучающимися практических навыков в курсе «Электроника и схемотехника», содержат теоретические сведения по принципам построения генераторов гармонических сигналов, принципиальные схемы генераторов на основе операционных усилителей, а также варианты заданий для выполнения лабораторных работ в среде Electronic Workbench 5.12.

Предназначены для обучающихся по направлению подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника и специальности 10.05.03 Информационная безопасность автоматизированных систем.

Данные методические указания будут также полезны и студентам других специальностей, изучающих курс схемотехники и обучающихся как по очной, так и заочной форме обучения.

Подготовлены на кафедре информационных систем и технологий.

Минимальные системные требования:

PC, процессор Pentium, 160 МГц;
Microsoft Windows XP; мышь;
дисковод DVD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

Редакционно-издательская обработка издательства
Самарского университета

Подписано для тиражирования 03.04.2024.

Объем издания 0,8 Мб.

Количество носителей 1 диск.

Тираж 11 дисков.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского университета.

443086, Самара, Московское шоссе, 34.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ГЕНЕРАТОРЫ СИГНАЛОВ НА ОУ	6
1.1. Релаксационные генераторы	6
1.2. Автоколебательный мультивибратор	7
1.3. Ждущий мультивибратор (одновибратор)	8
1.4. Генератор прямоугольного и треугольного напряжений.....	9
1.5. Условия возбуждения генератора	10
1.6. RC-генератор синусоидальных колебаний.....	11
1.7. Порядок выполнения работы	13
2. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА.....	15
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ	16

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания «Генератор синусоидального сигнала на операционном усилителе» сочетают в себе теоретические сведения по принципам построения генераторов гармонических сигналов и задания для выполнения лабораторной работы по курсу «Электроника и схемотехника».

Методические указания подготовлены на основе лекций для обучающихся по направлению подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника и по специальности 10.05.03 Информационная безопасность автоматизированных систем, но могут быть полезны и для студентов других специальностей и направлений.

1. Генераторы сигналов на ОУ

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 звукотехнике или пилообразной в развертке осциллографа).

Схемотехнически электронный генератор представляет собой усилитель, охваченный 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.

1.1. Релаксационные генераторы

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. Основой релаксационных генераторов на ОУ является обычно регенеративный компаратор, называемый также триггером Шмитта. Регенеративный компаратор представляет собой операционный усилитель с резистивной положительной обратной связью (рис. 1).

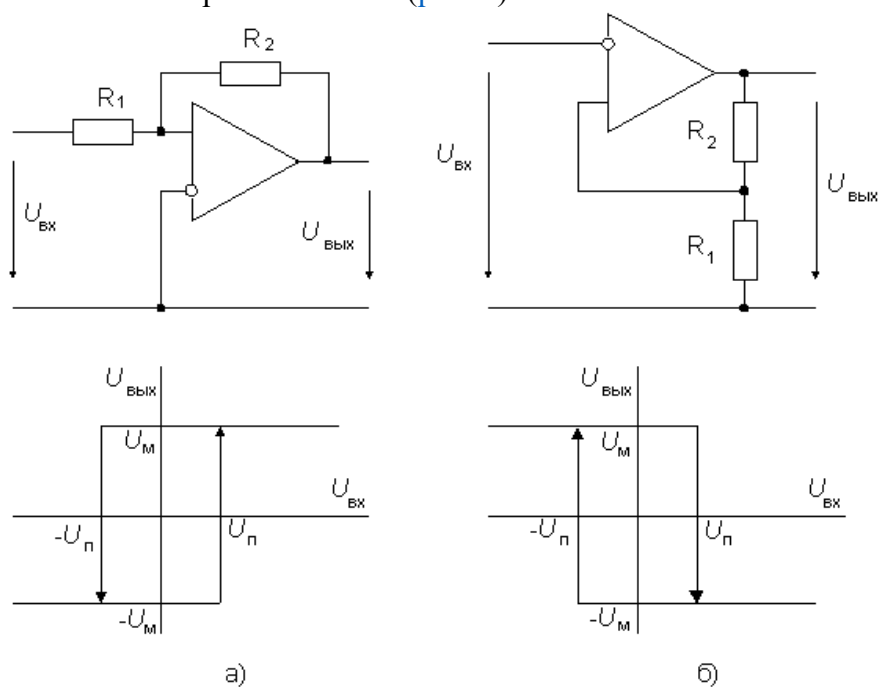


Рис. 1. Триггер Шмитта: неинвертирующий (а) и инвертирующий (б)

Переходная характеристика компаратора имеет гистерезис, ширина которого равна удвоенному пороговому напряжению $2U_{\text{п}}$, причем для схемы на [рис. 1,а](#)

$$U_{\text{п}} = U_{\text{м}} \frac{R_1}{R_2},$$

а для схемы на [рис. 1,б](#)

$$U_{\text{п}} = U_{\text{м}} \frac{R_1}{R_2 + R_1}, \quad (1)$$

где $U_{\text{м}}$ – выходное напряжение насыщения усилителя.

1.2. Автоколебательный мультивибратор

Схема автоколебательного мультивибратора приведена на [рис. 2,а](#). Он состоит из инвертирующего триггера Шмитта, охваченного отрицательной обратной связью с помощью интегрирующей RC -цепочки.

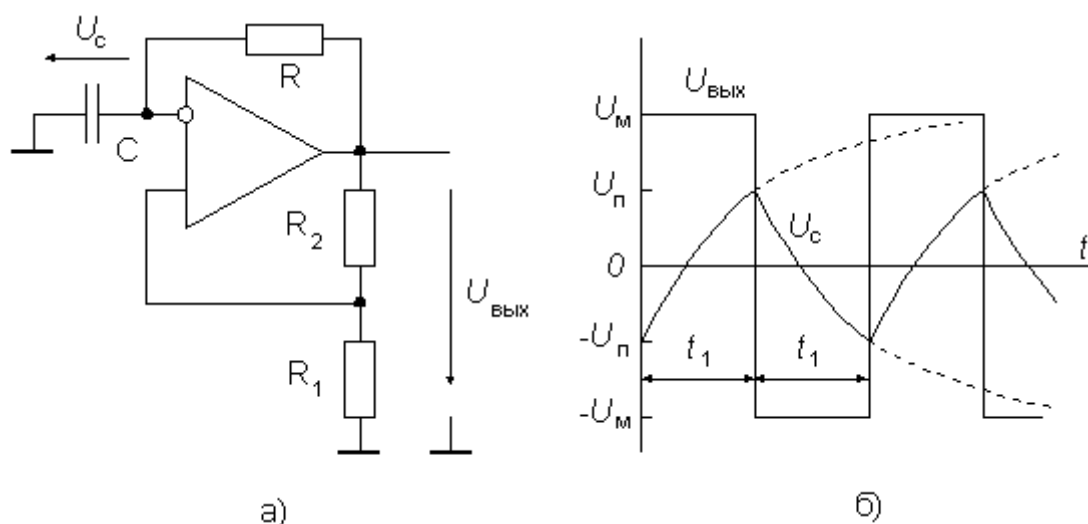


Рис. 2. Схема мультивибратора (а) и временная диаграмма его работы (б)

Когда напряжение u_c достигает порога срабатывания триггера Шмитта, схема переключается и ее выходное напряжение скачком принимает противоположное значение. При этом конденсатор начинает перезаряжаться в противоположном направлении, пока его напряжение не достигнет другого порога срабатывания. Схема переключается в первоначальное состояние ([рис. 2,б](#)).

Анализ схемы мультивибратора позволяет записать дифференциальное уравнение:

$$\frac{dU_c}{dt} = \pm \frac{U_{\text{м}} - U_c}{RC}. \quad (2)$$

При начальных условиях $U_c(0) = -U_{\text{п}}$ решение этого уравнения имеет вид:

$$U_c(t) = U_{\text{м}} - (U_{\text{м}} + U_{\text{п}})e^{-t/RC}.$$

Значение напряжения, равное порогу срабатывания триггера Шмитта (условие $u_c(t) = U_{\text{п}}$, будет достигнуто спустя время

$$t_1 = RC \ln [1 + 2R_1/R_2].$$

Период колебаний мультивибратора, таким образом, будет равен

$$T=2t_l = 2RC \ln [1 + 2R_1/R_2].$$

Как видно из последней формулы, период колебаний мультивибратора не зависит от напряжения U_M , которое, в свою очередь определяется напряжением питания $U_{пит}$. Поэтому частота колебаний мультивибратора на ОУ мало зависит от питающего напряжения.

1.3. Ждущий мультивибратор (одновибратор)

Обычное назначение ждущего мультивибратора – получение одиночного импульса заданной длительности. Отсчет длительности импульса начинается от фронта (или уровня) специального запускающего импульса. Для того, чтобы перейти от схемы автоколебательного к схеме ждущего мультивибратора, необходимо ввести дополнительно цепь запуска и цепь «торможения». Схема одновибратора приведена на [рис. 3,а](#).

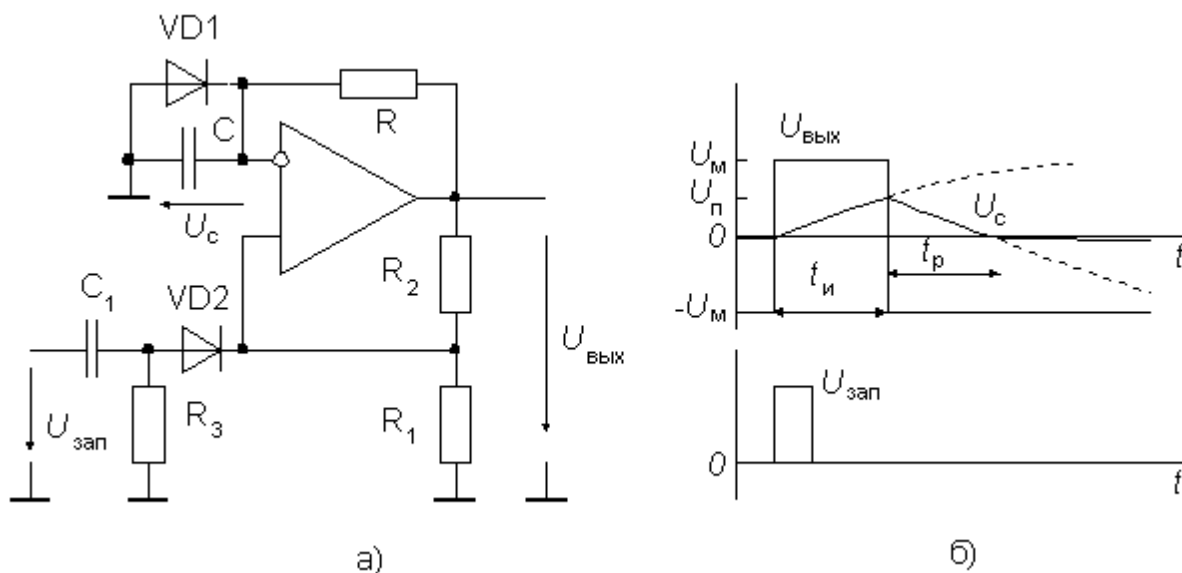


Рис. 3. Схема одновибратора (а) и временная диаграмма его работы (б)

Если выходное напряжение ОУ отрицательное максимальное, то диод VD1 открыт, и напряжение на времязадающем конденсаторе u_c небольшое отрицательное, равное примерно 0,5 В. При правильном выборе параметров схемы напряжение на неинвертирующем входе ОУ

$$U_p = -U_M \frac{R_1 || R_3}{R_1 || R_3 + R_2} < U_c,$$

поэтому при отсутствии запускающего импульса $U_{зап}$ схема находится в устойчивом состоянии. По приходе положительного запускающего импульса достаточной амплитуды операционный усилитель за счет положительной обратной связи переключается в такое состояние, при котором его выходное напряжение равно $+U_M$. Диод VD2 закрывается и на p -входе ОУ устанавливается напряжение $U_п$, определяемое выражением (1). К времязадающей цепи RC теперь приложено

напряжение $+U_M$, под действием которого закрывается диод VD2 и начинается заряд конденсатора C . Когда, спустя время t_1 , напряжение u_c достигнет порога U_n , операционный усилитель переключится и вернется в первоначальное состояние. Конденсатор C начнет разряжаться и, спустя промежуток времени t_p , называемый временем релаксации, напряжение u_c станет отрицательным, диод VD1 откроется и цикл закончится.

Процессы в схеме описываются тем же уравнением (2), но начальное условие иное, и его решение для одновибратора имеет вид:

$$U_c(t) = U_M - (U_M + U_D)e^{-t/RC},$$

где U_D – падение напряжения на открытом диоде VD1. Отсюда по условию $u_c(t_1) = U_n$ найдем длительность импульса одновибратора:

$$t_1 = RC \ln \{ [1 + (R_1/R_2)] [1 + (U_D/U_M)] \}.$$

Из последнего выражения видно, что длительность импульса одновибратора зависит от выходного напряжения насыщения ОУ, которое, в свою очередь определяется напряжением питания. Другим недостатком рассмотренной схемы является значительное время релаксации, в течение которого на одновибратор нельзя подавать запускающий импульс (иначе будет сокращена длительность выходного импульса). Эти недостатки отсутствуют у одновибраторов, выполненных на специализированных ИМС, называемых аналоговыми таймерами.

1.4. Генератор прямоугольного и треугольного напряжений

Как видно из диаграммы на [рис. 3,б](#), в схеме мультивибратора формируется напряжение не только прямоугольной формы, но и формы, близкой к треугольной (на конденсаторе). Времязадающая RC -цепь мультивибратора выполняет приближенное интегрирование выходных прямоугольных колебаний. Заменяв эту цепь интегратором на ОУ, получим генератор, на одном из выходов которого формируются прямоугольные, а на другом – треугольные колебания ([рис. 4](#)). Здесь на усилителе ОУ1 выполнен неинвертирующий триггер Шмитта, а на ОУ2 – интегратор.

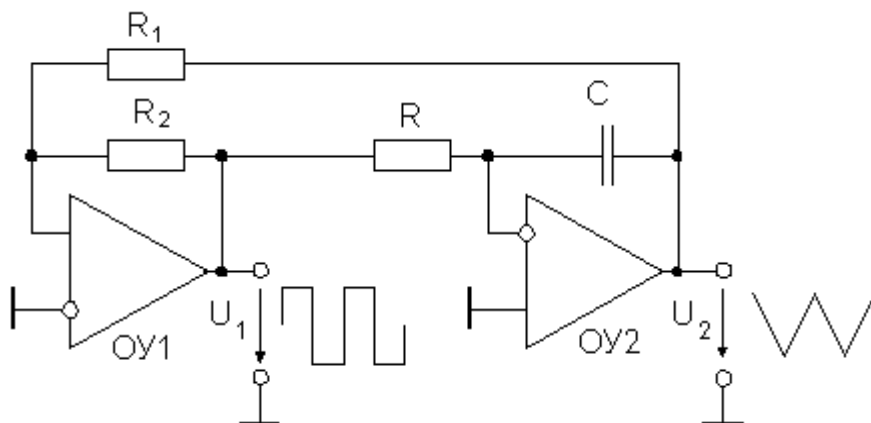


Рис. 4. Схема генератора прямоугольных и треугольных колебаний

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 $U_M R_1 / R_2$ (U_M – по-прежнему напряжение насыщения ОУ).

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

$$T = 4RC \frac{R_1}{R_2}.$$

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

1.5. Условия возбуждения генератора

На рис. 5 показана блок-схема генератора. Усилитель усиливает входной сигнал в $\overline{K_u}$ раз. При этом между выходным $\overline{U_{\text{вых}}}$ и входным $\overline{U_{\text{вх}}}$ напряжениями усилителя возникает фазовый сдвиг φ_1 . 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 $\overline{\beta U_{\text{вых}}}$. Обозначим аргумент комплексного коэффициента звена обратной связи $\overline{\beta}$ символом ψ .

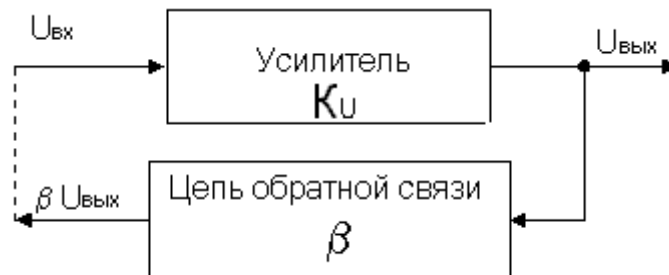


Рис. 5. Блок-схема электронного генератора

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

$$\overline{\beta U_{\text{вых}}} = \overline{U_{\text{вх}}} = \frac{\overline{U_{\text{вых}}}}{\overline{K_u}}.$$

Коэффициент петлевого усиления должен, таким образом, равняться

$$\overline{\beta K_u} = 1.$$

Из последнего комплексного соотношения вытекают два вещественных:

$$|\overline{\beta}| |\overline{K_u}| = 1, \tag{3}$$

$$\varphi + \psi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots \tag{4}$$

Уравнение (3) называют условием баланса амплитуд, а (4) – 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.

1.6. RC-генератор синусоидальных колебаний

Простейшая схема RC-генератора синусоидальных колебаний на операционном усилителе приведена на рис. 6,а.

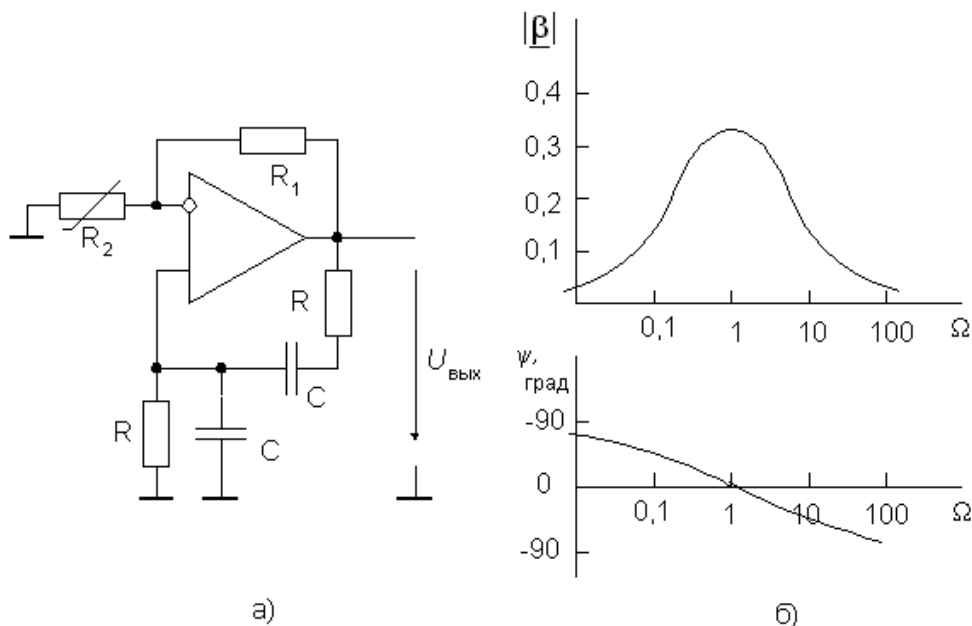


Рис. 6. RC-генератор синусоидальных колебаний

В качестве звена обратной связи использован полосовой RC-фильтр, частотные характеристики которого приведены на рис. 6,б. Здесь по оси абсцисс отложена относительная частота $\Omega = \omega RC$, поэтому средняя частота равна единице. 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

$$R_1 = 2R_2. \quad (5)$$

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

При строгом выполнении условия (3) и идеальном ОУ в схеме на рис. 2,а будут существовать незатухающие колебания с частотой $f = \frac{1}{2\pi RC}$. Однако амплитуда этих колебаний не будет определена. Кроме того, даже самое незначительное уменьшение R_1 по сравнению с (5) вызовет затухание колебаний. Напротив, увеличение R_1 по сравнению с (5) 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. Другим вариантом автоматического регулирования амплитуды является добавление последовательно с резистором R_1 цепочки из двух параллельно соединенных диодов, сопротивление которой будет меняться в зависимости от амплитуды выходного сигнала.

Варианты задания

№ варианта	Частота, Гц	Напряжение, В
1	200	5,0
2	250	4,5
3	300	4,0
4	350	3,5
5	400	3,0
6	450	2,5
7	500	3,0
8	550	3,5
9	600	4,0
10	650	4,5
11	700	5,0
12	750	5,0
13	800	4,5
14	850	4,0
15	900	3,5
16	950	3,0
17	1000	2,5
18	1050	3,0
19	1100	3,5
20	1150	4,0
21	1200	4,5
22	1250	5,0
23	1300	4,5
24	1350	4,0
25	1400	3,5

1.7. Порядок выполнения работы

1. Настройка и измерение характеристик моста Вина.

1.1 Рассчитать значения элементов моста Вина по формуле $f = \frac{1}{2\pi RC}$.

При этом, значение резонансной частоты выбрать из таблицы вариантов задания (номер варианта соответствует порядковому номеру в списке группы), значения резисторов выбрать произвольно в диапазоне 10 – 100 Ком, а значения емкости конденсаторов рассчитать по формуле.

1.2 Собрать схему цепи положительной обратной связи на основе моста Вина в среде **Electronic Workbench 5.12**.

1.3 Подключить измерительный прибор **Bode Plotter** к мосту Вина как показано на [рис. 7](#).

Прибор **Bode Plotter** предназначен для измерения АЧХ и ФЧХ четырехполюсников, при этом, выводы **In** необходимо подключить ко входу четырехполюсника, а выводы **Out** – к выходу четырехполюсника.

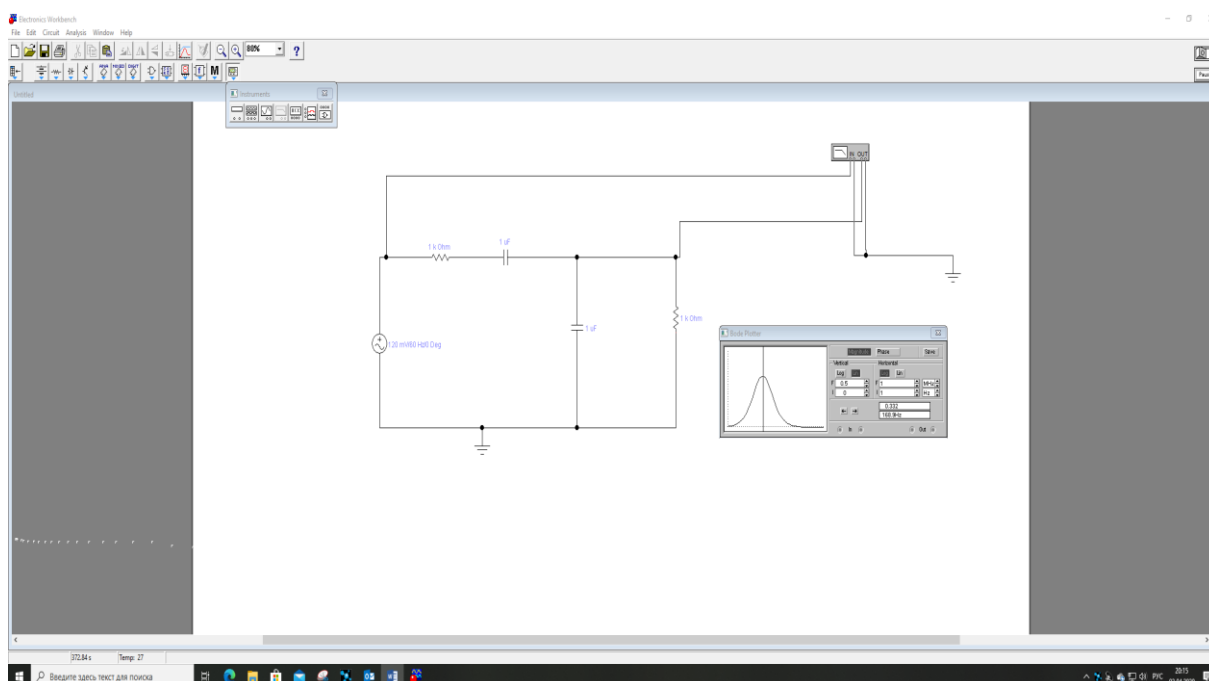


Рис. 7. Схема измерения АЧХ моста Вина

1.4 Измерить резонансную частоту, т.е. частоту, при которой коэффициент передачи моста Вина максимален. Например, на [рис. 7](#) эта частота равна 168,9 Гц. Сравнить измеренную частоту с заданной. Если разница более 1%, подстроить её при помощи одновременного изменения емкости конденсаторов в ту или иную сторону.

1.5 Измерить коэффициент передачи цепи ПОС на частоте резонанса. Например, на [рис. 7](#) этот коэффициент равен 0.332.

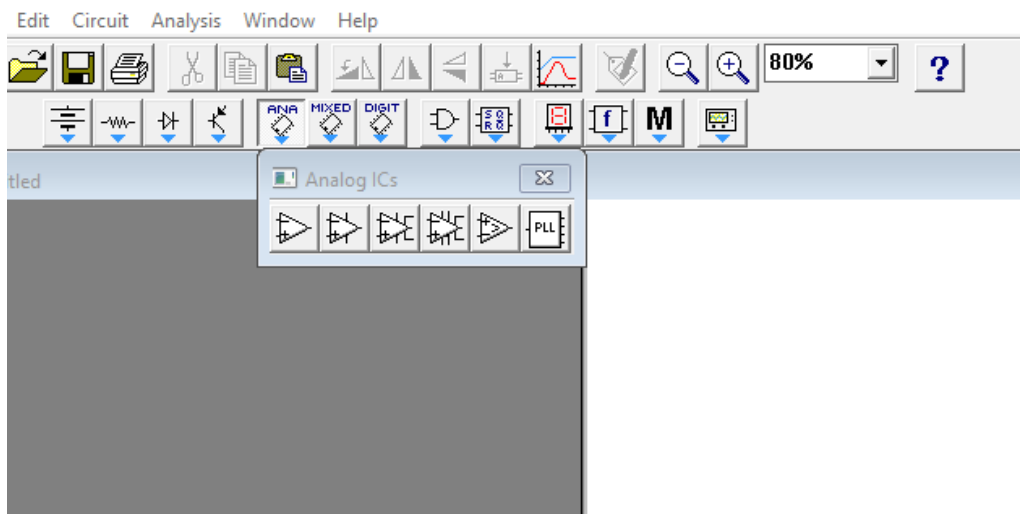
2. Настройка и измерение характеристик генератора.

2.1 Собрать схему генератора на основе моста Вина в среде **Electronic Workbench 5.12** в соответствии с [рис. 3,а](#).

2.2 Для емкостей и сопротивлений моста Вина установить значения, полученные в п. 1.

2.3 Значения сопротивлений R_1 и R_2 выбрать в диапазоне 10 – 100 Ком в соответствии с формулами (1) и (3).

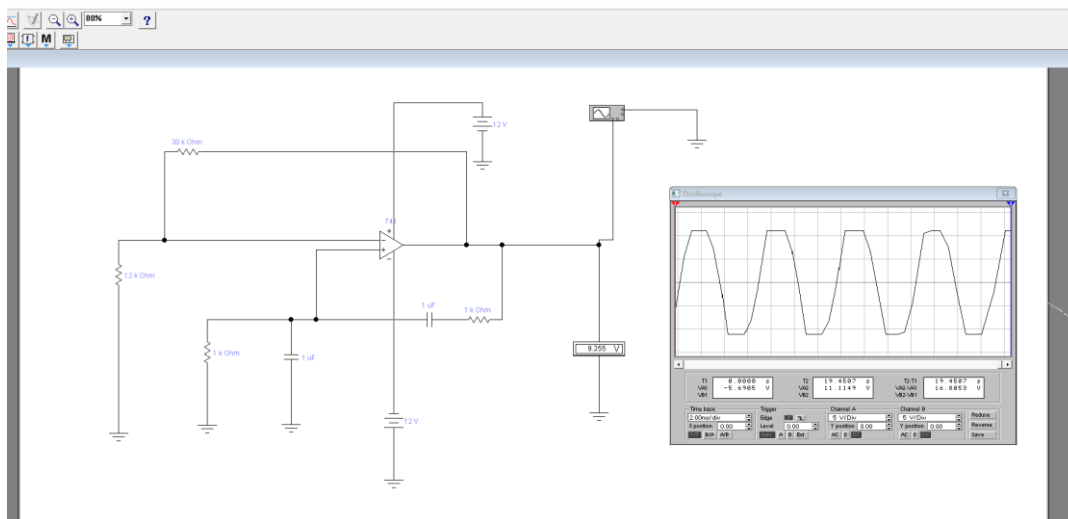
2.4 ОУ взять из папки.



2.5 Подключить к выходу генератора осциллограф и вольтметр в режиме АС.

2.6 Напряжение питания ОУ выбрать в диапазоне 12-15В.

2.7 Добейтесь перехода ОУ в состояние самовозбуждения. Если автоколебания не возникают, снижайте сопротивление R_2 . Должна получиться картинка наподобие этой.

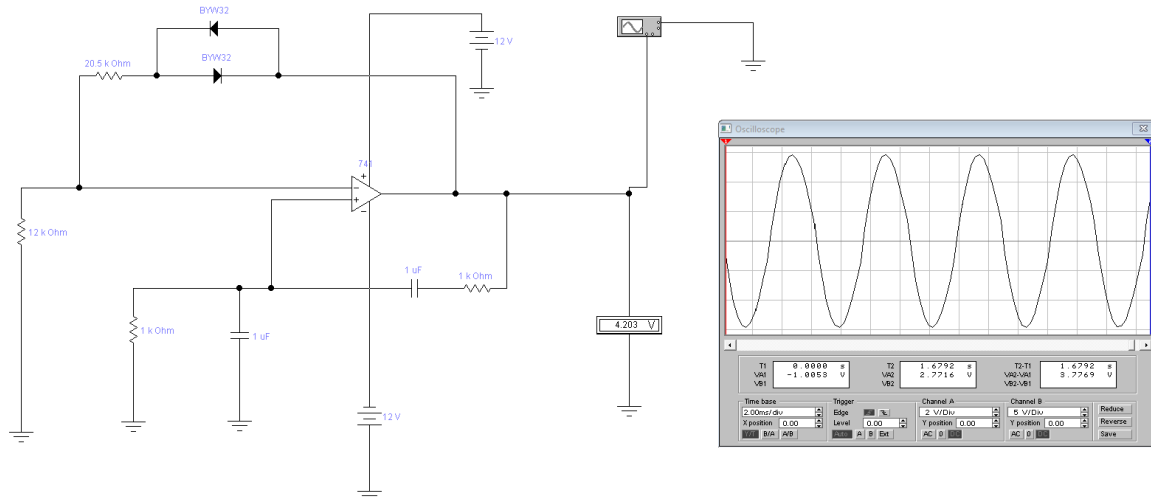


2.8 Измерить частоту колебаний при помощи осциллографа и сравнить её с заданной. Если разница более 1%, подстроить её при помощи одновременного изменения емкости конденсаторов моста Вина в ту или иную сторону.

2.9 Настроить величину выходного сигнала в соответствии с заданием. Для изменения величины выходного сигнала необходимо применить в составе генератора систему автоматического регулирования амплитуды, т.е. добавить в цепь отрицательной обратной связи нелинейный элемент, сопротивление которого будет меняться в зависимости от амплитуды выходного сиг-

нала. В качестве такого нелинейного элемента выбрать цепочку из двух параллельно соединенных диодов, соединенную последовательно с резистором R_1 . Диоды должны быть одинаковые, их можно взять из папки «general2». Напряжение на выходе генератора настроить подбором сопротивления R_1 в соответствии с заданием (погрешность не более 5%).

Например, так.



2.10 Если выходной сигнал по форме слишком сильно отличается от «идеальной» синусоиды, можно попробовать применить другую пару диодов из той же папки.

2. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Результаты всех расчетов.
2. Значения всех элементов схемы после настройки.
3. Все принципиальные схемы (те, которые я привел в описании порядка выполнения работы).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колмбет, Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов / Е.А. Колмбет. – Москва: Радио и связь, 1991. – 187 с.
2. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. – Москва: Мир, 1982. – 828 с.
3. Хоровиц, П. Искусство схемотехники. В 3 т. Т. 1 / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ. – 4-е изд. перераб. и доп. – Москва: Мир, 1993. – 413 с.