

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Операционный усилитель и устройства на его основе

Цель работы

Изучение характеристик и параметров операционного усилителя (ОУ) и нескольких устройств, построенных на его основе.

Теоретические сведения и расчётные формулы

Операционный усилитель (ОУ) - это высококачественный усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления, имеющий дифференциальный вход (два входных вывода), один общий выход и выполненный в интегральном исполнении. По размерам, цене и надёжности он практически не отличается от отдельного транзистора. В то же время, преобразование сигнала схемой на ОУ почти исключительно определяется свойствами цепей обратных связей и внешних навесных элементов. Благодаря практически идеальным характеристикам ОУ реализация различных электронных схем на его основе оказывается существенно проще, чем на транзисторах. Поэтому операционные усилители в значительной степени вытеснили отдельные транзисторы в качестве элементов схем во многих областях схемотехники.

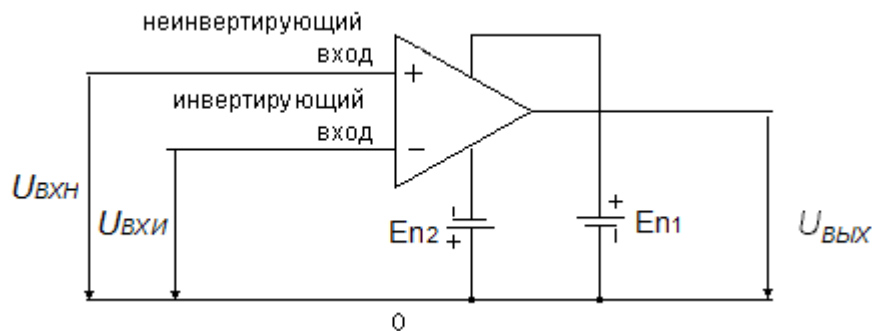


Рисунок 1 Обозначение ОУ

Условное обозначение ОУ показано на рис. 1. Один из входов усилителя ($U_{вхн}$ «+») называется неинвертирующим, а второй ($U_{вхи}$ «-») – инвертирующим. При подаче сигнала на неинвертирующий вход приращение выходного сигнала совпадает по знаку (фазе) с приращением входного сигнала. Если же сигнал подан на инвертирующий вход, то приращение выходного сигнала имеет обратный знак (противоположный по фазе). Чтобы обеспечить возможность работы операционного усилителя, как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами, следует использовать двухполярное питающее напряжение. Для этого нужно предусмотреть два источника постоянного напряжения, которые, как это показано на рис.1, подключаются к соответствующим внешним выводам ОУ. Обычно интегральные операционные усилители работают с напряжением питания от $\pm 3\text{В}$ до $\pm 18\text{В}$.

Основу ОУ составляет дифференциальный каскад, применяемый в качестве входного каскада усилителя. Выходным каскадом ОУ обычно служит эмиттерный повторитель (ЭП), обеспечивающий требуемую нагрузочную способность всей схемы.

Для уяснения принципов действия схем на ОУ, приближенного их расчета и анализа часто пользуются понятием идеального операционного усилителя. Будем называть идеальным операционный усилитель, который имеет следующие параметры:

- а. бесконечно большой дифференциальный коэффициент усиления по напряжению

$$K = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta(U_{\text{ВХН}} - U_{\text{ВХИ}}) = \infty \text{ (у реальных ОУ от 1 тыс. до 100 млн.)};$$

- b. нулевое напряжение смещения нуля $U_{\text{выхдр}}=0$, т.е. при равенстве входных напряжений выходное напряжение равно нулю (у реальных ОУ $U_{\text{см}}$, смещение нуля, приведенное ко входу, находится в пределах от 5 мкВ до 50 мВ);
- c. нулевые входные токи (у реальных ОУ от сотых долей пА до единиц мкА);
- d. нулевое выходное сопротивление (у реальных маломощных ОУ от десятков Ом до единиц кОм);
- e. коэффициент усиления синфазного сигнала равен нулю;
- f. мгновенный отклик на изменение входных сигналов (у реальных ОУ время установления выходного напряжения от единиц наносекунд до сотен микросекунд);
- g. частотный диапазон работы от постоянного тока до бесконечности.

Введение идеальных параметров ОУ при анализе схем позволяет получить очень простые расчетные формулы.

Важнейшими статическими характеристиками ОУ являются его передаточные (проходные) характеристики по неинвертирующему и инвертирующему входам. Характеристики снимаются при подаче сигнала на один из входов при нулевом сигнале на другом. Каждая из кривых состоит из горизонтальных и наклонного участков. На рис. 2 сплошной линией представлена проходная характеристика сбалансированного ОУ. Пунктирная линия соответствует реальной характеристике несбалансированного операционного усилителя.

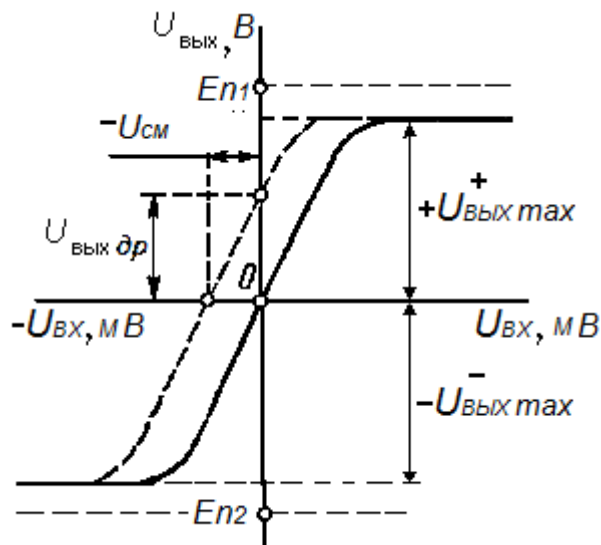


Рисунок 2 Проходные характеристики ОУ по неинвертирующему входу

Наклонному (линейному) участку кривых соответствует пропорциональная зависимость между выходным и входным напряжениями. Угол наклона участка определяется коэффициентом усиления $K = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$ операционного усилителя. Большие значения K позволяют при охвате таких усилителей глубокой отрицательной обратной связью получать схемы со свойствами, которые зависят только от параметров цепи отрицательной обратной связи. Этот участок используется для построения схем, работающих в линейном режиме (например, решающих усилителей).

Горизонтальные участки кривых соответствуют режимам насыщенного состояния выходного каскада. При изменении напряжения входного сигнала на этих участках выходное напряжение усилителя остается постоянным и определяется $+U_{\text{вых max}}$ и $-U_{\text{вых max}}$. Указанные значения максимальных выходных напряжений близки к напряжению E_n источников питания. Эти

участки используются для построения схем работающих в импульсных режимах (например, компараторов).

Сплошная кривая, приведенная на рис. 2, проходит через нуль. Состояние, когда $U_{вых}=0$ при $U_{вх}=0$, называется балансом ОУ. Однако, для реальных ОУ условие баланса обычно не выполняется (наблюдается «дрейф нуля»). При $U_{вх}=0$ выходное напряжение ОУ может быть больше или меньше нуля. На рис. 2 пунктирной линией показана одна из возможных передаточных характеристик реального ОУ. Напряжение $U_{см}$, при котором $U_{вых}=0$, называется входным напряжением смещения (приведенным дрейфом). Оно определяет значение напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ для создания баланса.

Необходимость учета входных токов может возникнуть при построении схем на ОУ, когда в цепь одного или обоих его входов включаются резисторы. Ввиду наличия входного напряжения смещения и входных токов смещения схемы на ОУ приходится дополнять элементами, предназначенными для начальной балансировки. Балансировка осуществляется путем подачи на один из входов ОУ некоторого дополнительного напряжения и введения резисторов в его входные цепи.

Формирование отличного от нуля напряжения на выходе ОУ при отсутствии входных сигналов (дрейф нуля) обусловлено неполной идентичностью транзисторов и пассивных элементов входного дифференциального каскада усилителя, изменением температуры окружающей среды, параметрами источников питания, старением активных элементов схемы и т.п. Подача напряжения смещения на один из входов ОУ или введение дополнительных цепей балансировки, подключаемых к специально предусмотренным для этой цели выводам ОУ, может существенно уменьшить погрешности, обусловленные действием всех перечисленных выше дестабилизирующих факторов, приводящих к дрейфу нуля.

Из динамических характеристик при исследовании ОУ в частотной области основной является ЛАЧХ ($L[\text{дБ}]=20 \cdot \log/K$). Операционный усилитель, предназначенный для универсального применения, из соображений устойчивости должен иметь такую же частотную характеристику, что и фильтр нижних частот первого порядка (инерционное звено), причем это требование должно удовлетворяться по крайней мере вплоть до частоты единичного усиления f_1 , т.е. такой частоты, при которой $|K|=1$. На рис. 3 представлена типичная логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) ОУ с осуществлённой частотной коррекцией.

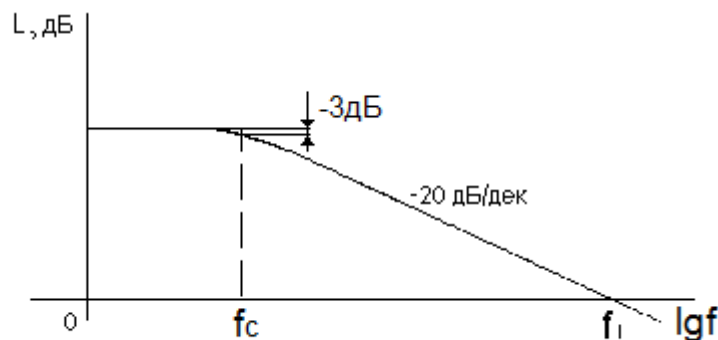


Рисунок 3 Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика скорректированного ОУ

Серийные операционные усилители выпускаются как с полной внутренней частотной коррекцией, реализованной в самом кристалле, так и с внешней, осуществляемой при помощи внешних корректирующих элементов, подключаемых к специальным выводам для более точной корректировки частотной характеристики при различных коэффициентах усиления.

Рассмотрим несколько схем устройств, использующих ОУ как в линейном, так и в нелинейном режимах.

На рис. 4 представлен **инвертирующий усилитель**, в котором ОУ работает в линейной области проходной характеристики. В схеме введена отрицательная обратная связь по напряжению параллельного типа. Входной сигнал через резистор R1 подаётся на инвертирующий вход.

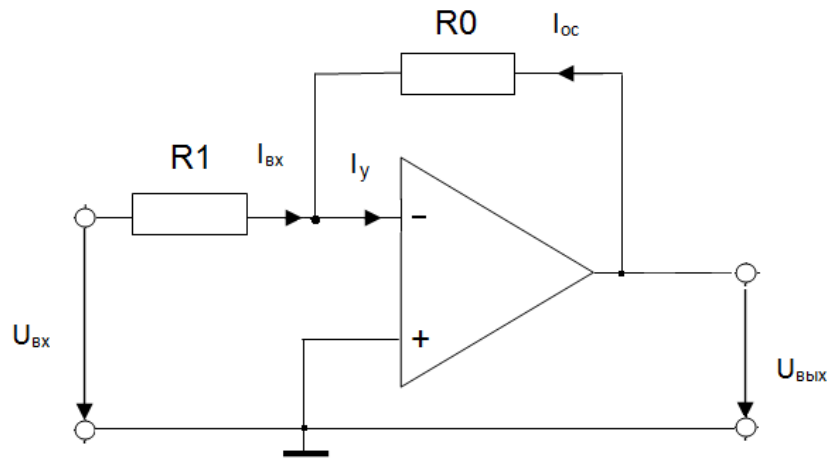


Рисунок 4 Схема инвертирующего усилителя

Таким образом, выходное напряжение усилителя находится в противофазе по отношению к входному напряжению. Приняв ОУ идеальным, легко определить коэффициент усиления по напряжению инвертирующего усилителя

$$K_{UH} = -\frac{R0}{R1} \quad (1)$$

и входное сопротивление схемы $R_{BXH}=R1$.

У **неинвертирующего усилителя** (рис. 5) входной сигнал подается непосредственно на неинвертирующий вход ОУ, а на инвертирующий вход через делитель на резисторах R1 и R0 поступает сигнал с выхода усилителя (введена отрицательная обратная связь по напряжению последовательного типа).

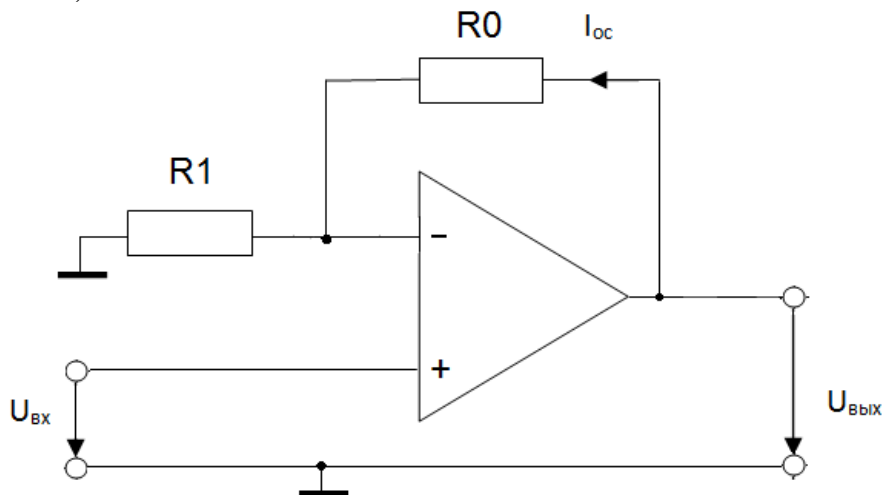


Рисунок 5 Схема неинвертирующего усилителя

Для идеального ОУ коэффициент усиления по напряжению неинвертирующего усилителя рассчитывается по формуле

$$K_{UH} = 1 + \frac{R0}{R1} . \quad 2)$$

Ввиду того, что входные токи идеального ОУ равны нулю, входное сопротивление неинвертирующего усилителя стремится к бесконечности $R_{BXH}=\infty$.

Операционный усилитель получил свое название из-за способности выполнения над аналоговыми сигналами алгебраических действий сложения, вычитания, умножения, интегрирования, дифференцирования, логарифмирования и др. в реальном времени. Это достигается путем включения в входные цепи и цепи обратной связи резисторов, конденсаторов, а также элементов с нелинейными характеристиками - диодов и транзисторов.

На рис. 6 приведена схема **сумматора**, использующего инвертирующую схему включения операционного усилителя.

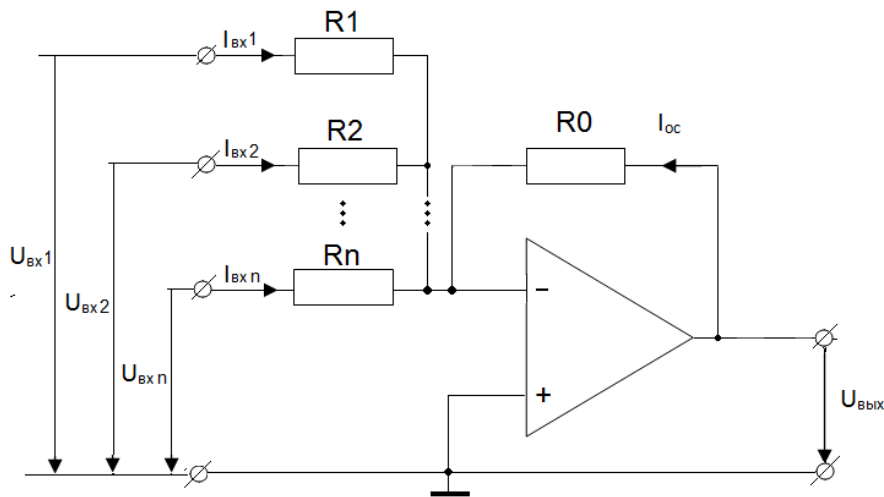


Рисунок 6 Схема инвертирующего сумматора

Приняв идеальную модель ОУ, выходное напряжение схемы можно определить из выражения

$$U_{\text{вых}}(t) = -\left[\frac{R_0}{R_1} \cdot U_{\text{вх}1}(t) + \frac{R_0}{R_2} \cdot U_{\text{вх}2}(t) + \dots + \frac{R_0}{R_n} \cdot U_{\text{вх}n}(t)\right] = -\sum_{i=1}^n K_i U_{\text{вх}i}(t), \quad (3)$$

где K_i – весовой коэффициент усиления по каждому из входных сигналов,

$$K_i = \frac{R_0}{R_i}.$$

Рассмотрим работу операционного усилителя в импульсном режиме без введения ООС на участках насыщения проходной характеристики (рис. 2). Выходное напряжение ОУ в этом режиме определяется либо напряжением $+U_{\text{вых max}}^+$ либо напряжением $-U_{\text{вых max}}^-$. Простейшее устройство, использующее такой режим, называется компаратором. **Компаратор** служит для сравнения входного напряжения ($U_{\text{вх}}$) с опорным напряжением (U_0). Схема компаратора приведена на рис. 7,(а). Опорное напряжение представляет собой неизменное по величине напряжение положительной или отрицательной полярности, а входное напряжение изменяется во времени. При достижении входным напряжением уровня опорного напряжения происходит изменение полярности напряжения на выходе ОУ. Проходная характеристика компаратора приведена на рис. 7,(б). Если разность напряжений $U_{\text{вх}} - U_0 < 0$, то на выходе устанавливается напряжение отрицательной полярности $-U_{\text{вых max}}^-$. При $U_{\text{вх}} - U_0 > 0$ выходной сигнал определяется напряжением $+U_{\text{вых max}}^+$. Компаратор с $U_0 = 0$ часто называют нуль-органом, поскольку переключение происходит при $U_{\text{вх}} - U_0 \approx 0$. Компараторы нашли применение в системах автоматического управления и в измерительной технике, для построения различных узлов импульсного и цифрового действия, а также в АЦП и ЦАП.

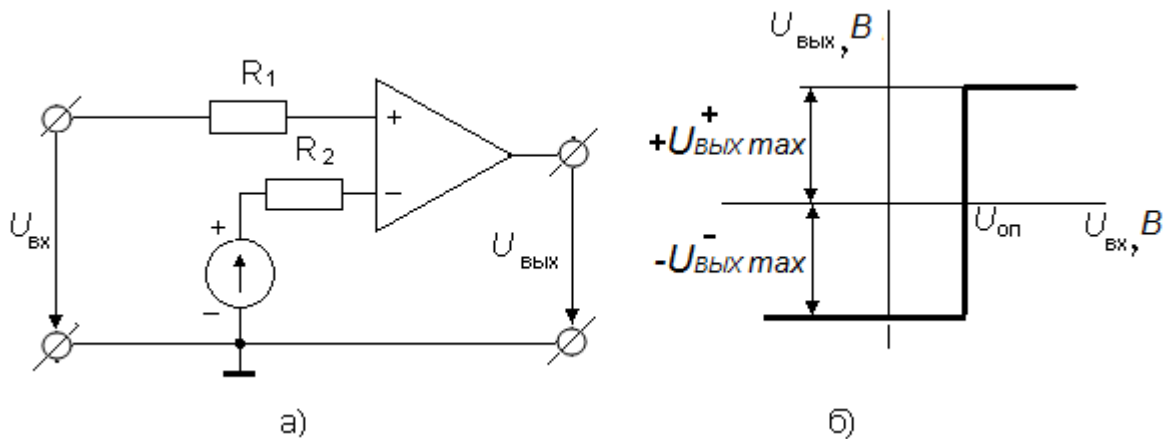


Рисунок 7 Схема компаратора (а) и его проходная характеристика (б)

Еще одним устройством, использующим нелинейный режим работы ОУ, является мультивибратор.

Мультивибратор предназначен для генерирования периодической последовательности импульсов напряжения прямоугольной формы с требуемыми параметрами (амплитудой, длительностью, частотой следования и др.). Он работает в режиме самовозбуждения. Для формирования импульсного сигнала в мультивибраторах не требуется внешнее воздействие, например подача входных сигналов. Процесс получения импульсного напряжения основывается на преобразовании энергии источников питания. Схема симметричного мультивибратора на ОУ приведена на рис. 8(а).

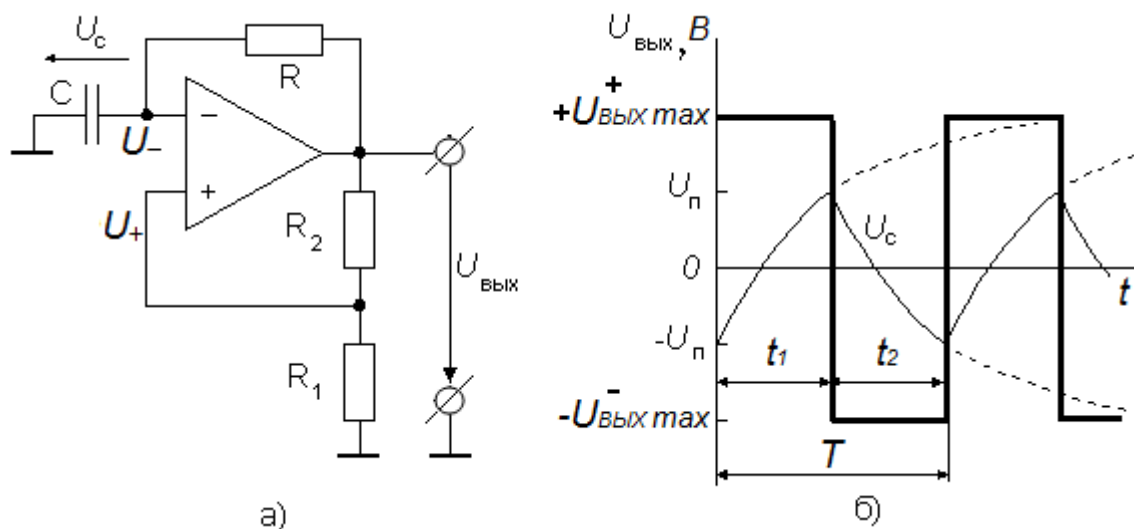


Рисунок 8 Схема симметричного мультивибратора на ОУ(а) и его временные диаграммы (б)

Основой схемы служит компаратор с положительной обратной связью (триггер Шмитта). Автоколебательный режим работы создается благодаря подключению к инвертирующему входу ОУ времязадающей цепи из конденсатора C и резистора R . Принцип действия схемы иллюстрируют временные диаграммы, приведенные на рис. 8(б). На выходе мультивибратора имеем напряжения насыщения $+U_{\text{вых max}}$ и $-U_{\text{вых max}}$, представляющие колебания прямоугольной формы. Когда напряжение на конденсаторе u_c достигает порога срабатывания триггера Шмитта $U_{\text{п}}$, схема переключается и её выходное напряжение скачком принимает противоположное значение. При этом конденсатор начинает перезаряжаться в противоположном направлении, пока его напряжение не достигнет другого порога срабатывания $-U_{\text{п}}$. Значение напряжения, равное порогу срабатывания триггера Шмитта (условие $u_c(t) = U_{\text{п}}$), будет достигнуто спустя время $t_1 = RC \ln[1 + 2R_1/R_2]$. Поскольку перезаряд конденсатора с одной полярности на другую происходит

с одной и той же постоянной времени $\tau = C \cdot R$, имеем равенство времен $t_1 = t_2$ и период колебаний мультивибратора $T = 2t_1 = 2RC \ln[1 + 2R_1/R_2]$. Частота следования импульсов симметричного мультивибратора определяется выражением

$$f = \frac{1}{2\tau \ln(1 + \frac{2R_1}{R_2})}. \quad (4)$$

Коэффициент заполнения K_3 импульсной последовательности на Рис.8(б) рассчитывается из отношения

$$K_3 = t_1 / (t_1 + t_2). \quad (5)$$

Для симметричного мультивибратора $K_3 = 0,5$.

Как видно из выражения (4), период колебаний мультивибратора не зависит от напряжений $+U_{\text{вых max}}$ и $-U_{\text{вых max}}$, которые, в свою очередь определяются напряжениями питания $E_{П1}$ и $E_{П2}$. Поэтому частота колебаний мультивибратора на ОУ мало зависит от питающего напряжения.

Работа с программным обеспечением

Изучаемые устройства моделируются в среде программы Multisim 10. Используются следующие группы элементов:

Операционный усилитель (operational amplifier):

Place → component → (group) analog → (family) OPAMP → 741 (6).

Источники (power sources):

Place → component → (group) sources → (family) power sources → AC_Power.

Place → component → (group) sources → (family) power sources → DC_Power.

Place → component → (group) sources → (family) power sources → Ground.

Резисторы (Resistor):

Place → component → (group) basic → (family) basic virtual → resistor virtual.

Емкости (capacitor):

Place → component → (group) basic → (family) basic virtual → capacitor virtual.

Переключатели (SWITCH):

Place → component → (group) basic → (family) SWITCH → SPDT(23).

Вольтметры:

Place → component → (group) indicators → (family) VOLTMETER → VOLTMETER_V (3).

Осциллограф (Oscilloscope), построитель частотных характеристик (Bode Plotter) и генератор сигналов (Function Generator).

Чтобы развернуть объект, нажмите правую кнопку мыши. В появившемся окне выберите режимы:

Flip horizontal – повернуть по горизонтали (Alt + X)

Flip vertical – повернуть по вертикали (Alt + Y)

90 clockwise – повернуть на 90 градусов по часовой стрелке. (Ctrl + R)

Чтобы удалить провод, выделите его и нажмите del.

После построения схемы, соединения всех элементов и задания их значений эмуляция включается значками на панели (выключатель или молния), в меню - командой Simulate → Run, или клавишей F5.

Для настройки двухканального осциллографа:

Изменяем временную развертку в окне: (Timebase) Scale

Изменяем чувствительность в окне: -(Channel A) Scale для входного сигнала

-(Channel B) Scale для выходного сигнала.

Для снятия показаний используются маркеры T1(красный) или T2(синий).

Для настройки прибора Bode Plotter (построителя частотных характеристик) установите его режимы работы:

Magnitude

Horizontal LOG			Vertical Log		
F	10	MHz	F	150	dB
I	0.1	Hz	I	-50	dB

Phase

Horizontal LOG			Vertical Lin		
F	10	MHz	F	180	Deg
I	0.1	Hz	I	-180	Deg

Чтобы произвести измерения частотных характеристик, необходимо перемещать по экрану маркер, который находится в верхнем левом углу.

Порядок выполнения работы

1 Исследование статических и динамических характеристик операционного усилителя общего применения без обратных связей

1.1 Собрать схему (рис. 9) или использовать готовую модель (OU-1.ms10).

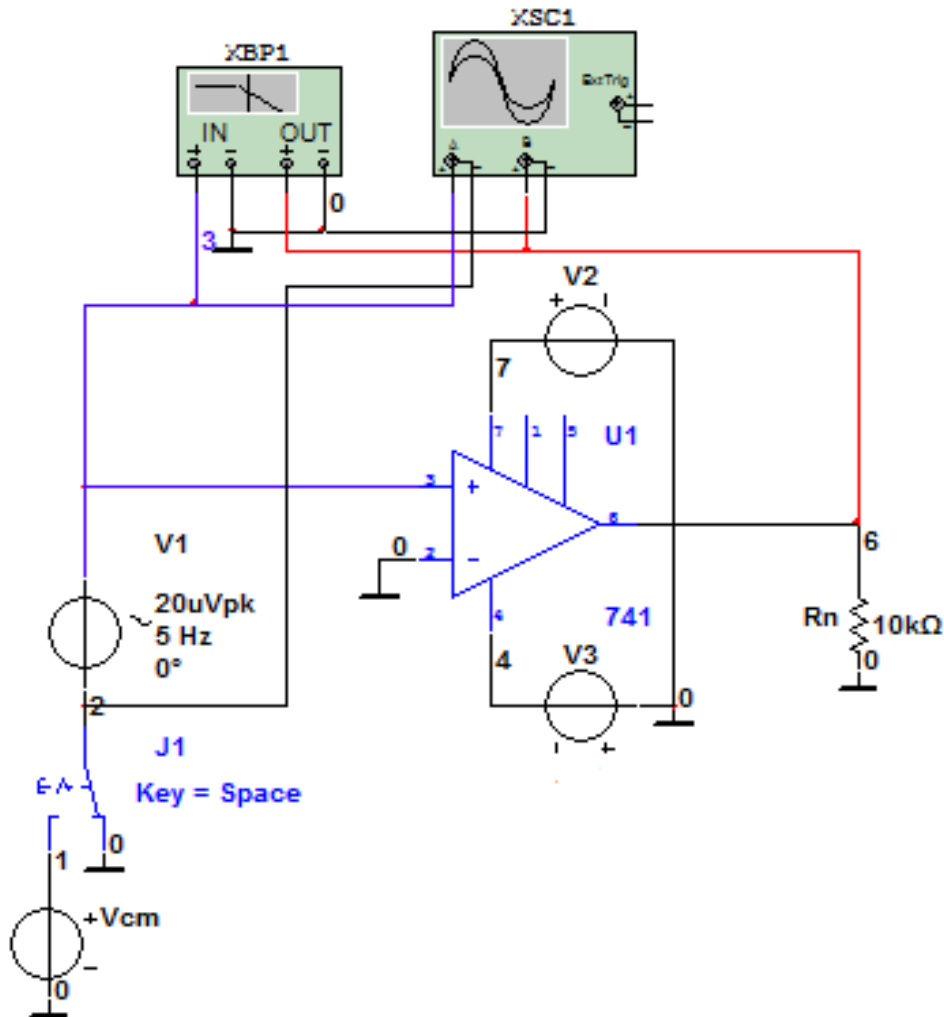


Рисунок 9 Схема для исследования характеристик операционного усилителя

Напряжения источников питания V2 и V3 выбираются в соответствии с Вашим вариантом (номером в списке группы):

- варианты 1, 7, 13, 19 имеют напряжение питания ± 5 В,
- варианты 2, 8, 14, 20 имеют напряжение питания ± 7 В,
- варианты 3, 9, 15, 21 имеют напряжение питания ± 9 В,
- варианты 4, 10, 16, 22 имеют напряжение питания ± 11 В,
- варианты 5, 11, 17, 23 имеют напряжение питания ± 12 В,
- варианты 6, 12, 18, 24 имеют напряжение питания ± 15 В,
- варианты 25, 26, 27, 28 имеют напряжение питания ± 17 В,
- варианты 29, 30 имеют напряжение питания ± 20 В.

1.2 Снять передаточную характеристику несбалансированного операционного усилителя.

- Переключатель J1 перевести в положение 0.
- Установить режим расчёта передаточной характеристики (Simulate - Analysis - DC Sweep) и параметры анализа: Source = vv1; Start value = -0.0015V; Stop Value = 0.0015V; Increment = 1e-007V. Настройка выходного сигнала: Output - Selected variables for analysis – V(6)
- Запустить программу расчёта, нажав на клавишу «Simulate» внизу окна настройки DC Sweep Analysis.
- По полученной передаточной характеристике определить напряжение смещения $U_{см}$. $U_{см}$ - это входное напряжение (x_1), при котором $U_{вых}$ (y_1) равно нулю (точка пересечения передаточной характеристики с осью абсцисс). Передаточную характеристику несбалансированного ОУ зафиксировать.

1.3 Снять передаточную характеристику сбалансированного операционного усилителя.

- Переключатель J1 перевести в положение 1. Установить напряжение смещения (полученное в пункте 1.2) на источнике $V_{см}$ с учётом полярности.
- Установить режим расчёта передаточной характеристики (Simulate - Analysis - DC Sweep) и параметры анализа: Source = vv1; Start value = -0.0005V; Stop Value = 0.0005V; Increment = 1e-007V. Настройка выходного сигнала: Output - Selected variables for analysis – V(6).
- Запустить программу расчёта, нажав на клавишу «Simulate» внизу окна настройки DC Sweep Analysis.
- По полученной передаточной характеристике определить следующие параметры:
 - $U_{макс+}$ - максимальное положительное выходное напряжение (max y);
 - $U_{макс-}$ - минимальное отрицательное выходное напряжение (min y);
 - K - коэффициент усиления по напряжению. Для этого установить два маркера на наклонном (линейном) участке характеристики и разделить разность показаний по оси ординат (dy) на разность показаний по оси абсцисс (dx). Коэффициент усиления определить в относительных единицах и в децибелах ($K_d(дБ) = 20 \lg K$).
- Передаточную характеристику сбалансированного ОУ зафиксировать.
- Проверить успешность балансировки.
- Результаты измерений занести в таблицу.

$U_{макс+}$, В	$U_{макс-}$, В	K	K_d , дБ	$U_{см}$, мВ

1.4 Снять частотные характеристики (ЛАЧХ и ФЧХ) сбалансированного операционного усилителя.

С этой целью:

- Установить режим расчёта частотных характеристик (Simulate - Analysis – AC Analysis) и параметры анализа: Start frequency = 0.1Hz; Stop frequency = 10MHz; Sweep type – Decade; Number of points per decade – 10; Vertical scale - Decibel. Настройка выходного сигнала: Output - Selected variables for analysis – V(6)
- Запустить программу расчёта, нажав на клавишу «Simulate» внизу окна настройки AC Analysis.
- По полученным частотным характеристикам определить:
 - частоту единичного усиления f_1 как частоту, где $K=1$ (или $K_d=0дБ$); экспериментально определяется как точка пересечения графика с осью абсцисс;
 - фазовый сдвиг на частоте f_1 ;
 - коэффициент усиления $K_{дс}$ и фазовый сдвиг на частоте $f_c = 5$ Гц.

- Сравнить K_{dc} с коэффициентом усиления K_d , полученным в пункте 1.3.
- Сравнить фазовые сдвиги на частотах f_1 и f_c .

1.5 Запустить схему, нажав на кнопку «Run» или клавишу F5.

Зафиксировать входной и выходной сигналы, полученные на экране осциллографа, а также частотные характеристики (ЛАЧХ и ФЧХ), полученные с помощью Bode Plotter. **При оформлении отчёта нанести на рисунки необходимые обозначения, размерности и масштабы.**

По сигналам на осциллограмме найти коэффициент усиления по напряжению K , сравнить его с записанным в таблице.

Сравнить ЛАЧХ и ФЧХ, полученные с помощью Bode Plotter, с частотными характеристиками, построенными в п. 1.4.

Определить полосу пропускания ОУ.

1.6 Сделать выводы.

2 Исследование работы инвертирующего усилителя

2.1 Собрать схему (рис. 10) или использовать готовую модель (OU-2.ms10).

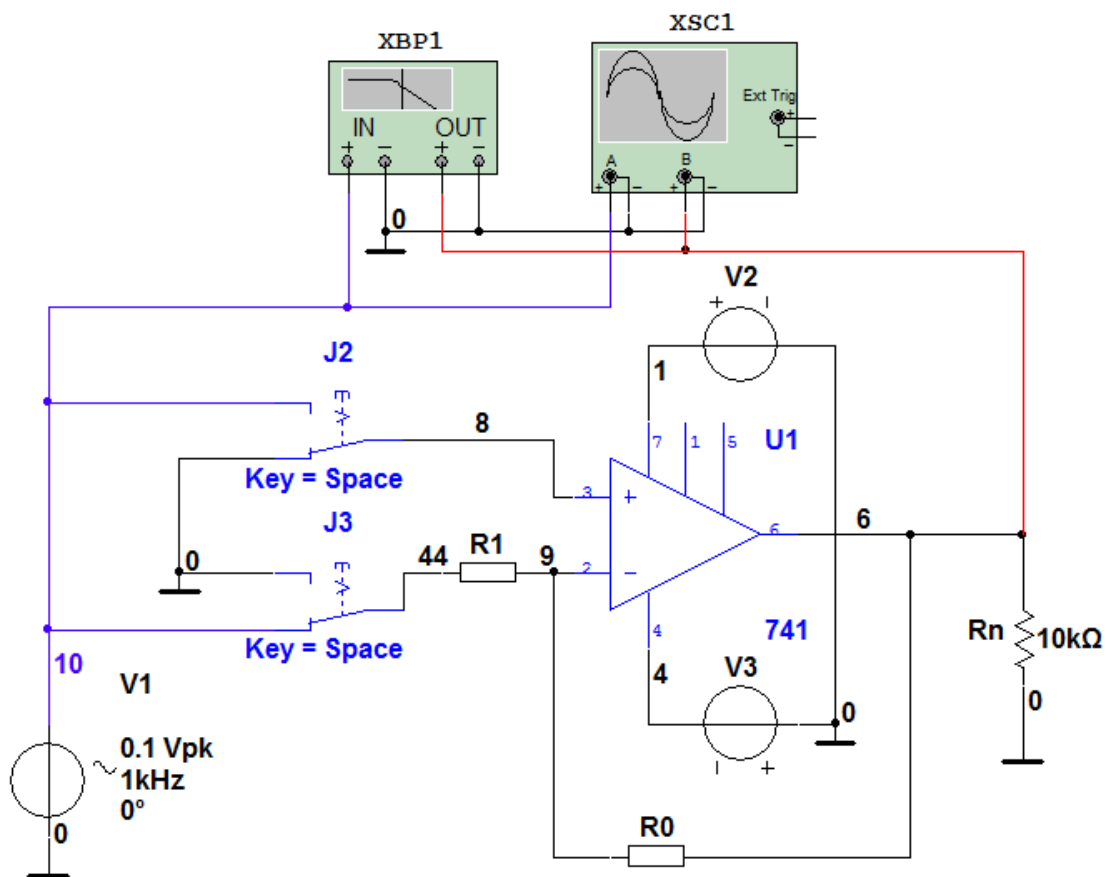


Рисунок 10 Схема для исследования инвертирующего и неинвертирующего усилителей

Напряжения источников питания V_2 и V_3 устанавливаются в соответствии с Вашим вариантом (номером в списке группы), см. п. 1.1.

Номиналы резисторов R_0 и R_1 схемы выбираются в соответствии с номером варианта из таблицы:

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R1, кОм	2.5	2.2	2.7	2.8	2.5	3.0	4.0	5.0	2.5	1.0
R0, кОм	15	12	28	4.4	5.2	9.2	16	20	9.0	7.2
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
R1, кОм	1.1	1.2	1.3	2.7	1.0	1.6	1.5	3.0	1.9	2.0
R0, кОм	3.6	4.8	9.2	16	5.0	5.4	7.5	15	19	15
№ варианта	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
R1, кОм	2.1	1.0	1.5	3.0	1.9	1.8	1.7	2.0	3.0	2.0
R0, кОм	10.2	7.5	13	10	5.2	8.8	7.1	10	20	12

Переключатели J2 и J3 установить в нижнее положение, что соответствует инвертирующему режиму работы ОУ.

2.2 Запустить схему моделирования и по полученной осциллограмме определить амплитуду выходного сигнала $U_{выхт}$. Осциллограммы входного и выходного сигналов схемы зафиксировать. Вычислить экспериментальный коэффициент усиления инвертирующего усилителя $K_{из} = -U_{выхт}/U_{вхт}$. Рассчитать коэффициент усиления схемы, принимая операционный усилитель идеальным ($K_{ир} = -R_0/R_1$).

2.3 Провести динамический анализ инвертирующего усилителя в частотной области при помощи прибора ХВР1 (Bode Plotter). Зафиксировать ЛАЧХ и ФЧХ исследуемой схемы. Определить верхнюю частоту $f_{вн}$ полосы пропускания инвертирующего усилителя.

3 Исследование работы неинвертирующего усилителя

3.1 В схеме, представленной на рис. 10, переключатели J2 и J3 установить в верхнее положение, что соответствует неинвертирующему режиму работы ОУ. Напряжения источников питания (V_2 , V_3) и номиналы резисторов (R_0 , R_1) оставить без изменения (см. пункт 2.1).

3.2 Запустить схему моделирования и по полученной осциллограмме определить амплитуду выходного сигнала $U_{выхт}$. Осциллограммы входного и выходного сигналов схемы зафиксировать. Вычислить экспериментальный коэффициент усиления неинвертирующего усилителя $K_{из} = U_{выхт}/U_{вхт}$. Рассчитать коэффициент усиления схемы, принимая операционный усилитель идеальным ($K_{ир} = 1 + R_0/R_1$).

3.3 Провести динамический анализ неинвертирующего усилителя в частотной области при помощи прибора ХВР1 (Bode Plotter). Зафиксировать ЛАЧХ и ФЧХ исследуемой схемы. Определить верхнюю частоту $f_{вн}$ полосы пропускания неинвертирующего усилителя.

3.4 Сделать выводы (сравнить коэффициенты усиления, осциллограммы и ЧХ исследованных усилителей – инвертирующего и неинвертирующего).

При оформлении отчёта нанести на рисунки необходимые обозначения, размерности и масштабы.

4 Исследование работы суммирующего усилителя

4.1 Собрать схему суммирующего усилителя (инвертирующего сумматора, рис. 11) или использовать готовую модель (OU-3.ms10).

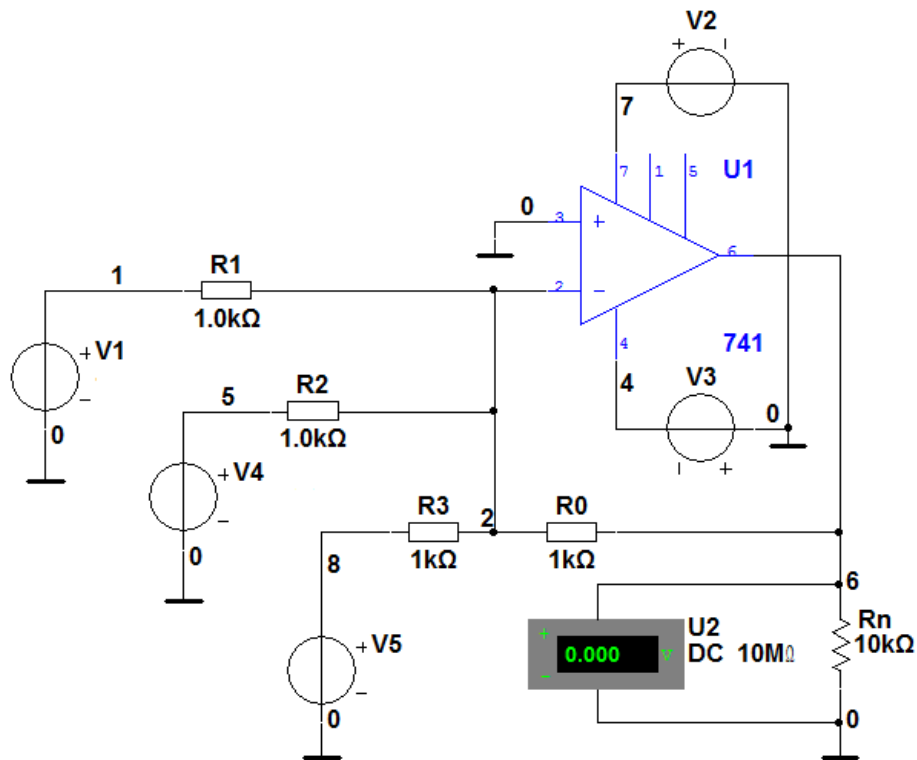


Рисунок 11 Схема суммирующего усилителя

Напряжения источников питания V2 и V3 устанавливаются в соответствии с Вашим вариантом (номером в списке группы), см. п. 1.1.

Номиналы резисторов R1, R2, R3, R0 одинаковы и равны 1кОм.

Напряжения источников входных сигналов V1, V4 и V5 схемы выбираются в соответствии с номером варианта из таблицы:

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V1, В	0.5	0.5	1.0	0.25	0.75	0.75	-0.7	-0.8	-0.9	-1.0
V4, В	2.0	0.5	0.5	1.25	0.5	0.25	2.8	- 1.4	0.75	-1.35
V5, В	-1.5	0.5	1.0	-1.0	1.0	-2.0	-1.25	0.18	2.8	2.7
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
V1, В	- 1.4	2.9	-1.3	0.83	0.6	3.3	0.5	-0.23	1.3	-1.4
V4, В	2.8	0.5	-1.7	0.42	0.95	- 1.4	3.32	1.25	-2.6	2.8
V5, В	0.75	-0.56	2.8	-0.56	-2.4	0.54	-2.07	-0.18	0.5	0.8
№ варианта	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
V1, В	1.25	0.5	0.5	1.0	0.25	0.75	- 0.27	0.28	0.5	3.0
V4, В	- 1.4	0.5	0.5	1.25	0.5	0.25	2.7	2.8	-0.56	0.5
V5, В	0.7	1.0	-1.0	1.0	-2.0	-1.50	0.72	- 1.4	1.25	-1.0

4.2 Установить значения напряжений источников питания (V2, V3) и входных сигналов (V1, V4, V5) суммирующего усилителя и запустить схему моделирования.

4.3 Определить выходное напряжение ($U_{вых}$) с помощью вольтметра U2.

4.4 Рассчитать выходное напряжение схемы, принимая ОУ идеальным. Сравнить экспериментальные и расчётные данные.

4.5 Сделать выводы.

5 Исследование работы компаратора

5.1 Собрать схему компаратора (рис. 12) или использовать готовую модель (OU-4.ms10).

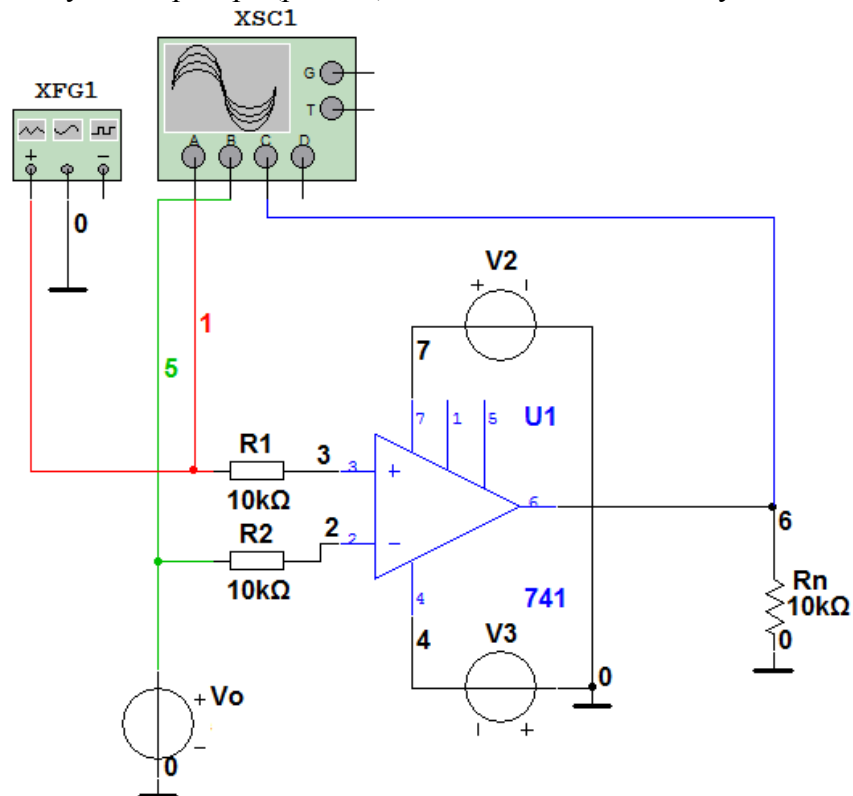


Рисунок 12 Схема компаратора

Напряжения источников питания V2 и V3 выбираются в соответствии с Вашим вариантом (номером в списке группы), см. п. 1.1.

Величина опорного напряжения U_0 выбирается в соответствии с номером варианта из таблицы:

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_0 , В	-0.75	-0.50	-0.43	0.54	0.65	-0.50	0.85	-0.80	0.90	-0.60
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U_0 , В	0.70	-0.82	0.35	-0.40	-0.55	0.66	0.77	-0.88	-0.91	0.70
№ варианта	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
U_0 , В	-0.48	-0.75	-0.50	-0.42	0.52	0.62	0.72	-0.48	0.92	-0.35

Установить опорное напряжение на источнике V_0 схемы компаратора. Сигнал на неинвертирующий вход ОУ подается с генератора XFG1(Function Generator) со следующими установками: Waveforms = пилообразный; Frequency = 10Hz; Duty Cycle = 50%; Amplitude = 1Vp; Offset = 0V. Для настройки осциллографа XSC1 (4 Channel Oscilloscope) установите время развертки Timebase scale = 20ms/Div. Выбор шкалы чувствительности по каналам осуществляется круглым переключателем на передней панели. Чувствительность по каналам Аи В составляет 1V/Div. По каналу С установка зависит от амплитуды выходных импульсов и составляет от 2V/Div до 10V/Div.

5.2 Запустить процесс моделирования и зафиксировать полученные осциллограммы на интервале, равном двум-трем периодам. Определить амплитуду U_m , период T, частоту f и коэффициент заполнения K_3 импульсов на выходе схемы.

5.3 Установить опорное напряжение на источнике $V_0 = 0$ и повторить пункт 5.2.

5.4 Сделать выводы.

6 Исследование работы мультивибратора

6.1 Собрать схему симметричного мультивибратора (рис. 13) или использовать готовую модель (OU-5.ms10).

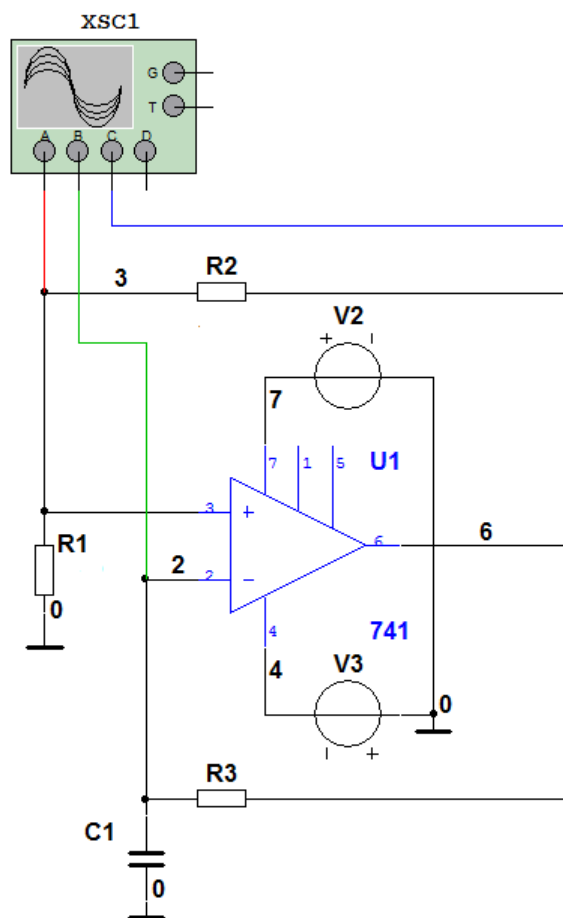


Рисунок 13 Схема симметричного мультивибратора

Напряжения источников питания V2 и V3 выбираются в соответствии с Вашим вариантом (номером в списке группы), см. п. 1.1.

Номиналы резисторов R1, R2, R3 и ёмкость конденсатора C1 схемы выбираются в соответствии с номером варианта из таблицы:

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R1, кОм	1.2	2.2	3.5	1.2	1.5	6.0	3.5	1.8	2.9	1.0
R2, кОм	2.4	2.2	3.5	1.3	1.5	6.0	1.7	1.8	2.9	1.3
R3, кОм	3.5	3.2	2.3	2.4	1.5	6.0	1.9	8.1	2.9	4.0
C1, мкФ	1.3	2.0	3.0	0.7	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.1
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
R1, кОм	1.1	1.2	1.3	2.3	1.2	2.0	1.0	1.8	2.0	1.0
R2, кОм	1.1	1.2	1.3	2.6	2.4	1.0	1.7	2.8	2.0	3.0
R3, кОм	2.2	2.4	2.6	3.1	2.6	1.4	2.0	3.8	4.0	1.0
C1, мкФ	0.1	0.2	0.5	0.4	1.3	1.6	1.0	1.8	0.5	1.0
№ варианта	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
R1, кОм	2.9	1.0	1.0	1.4	1.0	2.6	2.7	2.8	1.0	1.5
R2, кОм	5.7	2.0	3.0	4.1	2.0	3.6	2.7	1.4	2.0	3.0
R3, кОм	2.8	1.0	2.0	4.0	4.0	2.6	1.3	2.8	1.0	3.3
C1, мкФ	1.9	2.0	0.5	1.0	1.0	0.6	2.7	0.8	2.0	0.3

6.2 Запустить схему моделирования и зафиксировать полученные осциллограммы на интервале, равном двум-трём периодам. Определить амплитуды U_m , период T_z , и частоту f_z следования импульсов.

6.3 Рассчитать период T и частоту f следования импульсов схемы с установленными параметрами, принимая ОУ идеальным. Сравнить экспериментальные и расчётные данные.

6.4 Сделать выводы.

При оформлении отчёта нанести на рисунки необходимые обозначения, размерности и масштабы.

7 Контрольные вопросы

1 Почему ЛАЧХ ОУ не имеет «завала» в области низких частот?

2 Почему ОУ без отрицательных обратных связей в качестве усилителей не применяются?

3 Как обеспечивается нулевой выходной сигнал на выходе ОУ при отсутствии входного сигнала?

4 Почему на выходе мультивибратора имеем сигнал при отсутствии входного сигнала?

5 Какими параметрами обладает идеальный ОУ и почему вводится понятие идеального операционного усилителя?