## Лабораторная работа №1

## Электронные устройства на операционных усилителях

### Цель работы

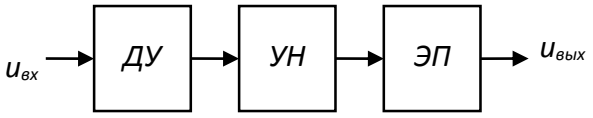
Изучение принципа работы операционных усилителей и исследование характеристик устройств на их основе: инвертирующего и неинвертирующего усилителей, интегратора, дифференциатора, сумматора, генераторов напряжения.

### Теоретические сведения

### Назначение и условное обозначение ОУ

*Операционный усилитель* (ОУ) – это малогабаритный (в интегральном исполнении отечественных серий К140, К544, К553, КР1040УД, КР1435 и др. и импортных серий AD8041, OP275, LM339 и др.) многокаскадный усилитель постоянного тока с непосредственными связями между каскадами и большим коэффициентом усиления.

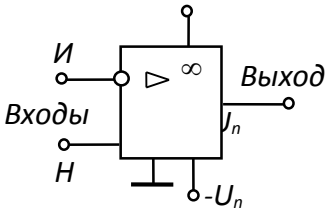
Операционные усилители предназначены как для усиления электрических сигналов, так и для осуществления различных операций над сигналами: сложение, вычитание, интегрирование, логарифмирование и др. Кроме этого, операционные усилители часто используют при конструировании компараторов, генераторов гармонических колебаний и сигналов различной формы, избирательных усилителей и других устройств. Такие усилители имеют симметричный дифференциальный высокоомный




*ДУ – дифференциальный усилитель*

*УН – промежуточный усилитель*

*а*)




*б*)

Рис.1

вход, высокий коэффициент усиления, низкоомный (сравнительно мощный) выход и сконструированы таким образом, что к ним могут быть подключены различные корректирующие цепи и цепи обратной связи.

Функциональная схема типового ОУ представлена на рис. 1, *а*, а его условное обозначение – на рис 1, *б*. Входной дифференциальный каскад ОУ, обычно реализуемый на полевых транзисторах, обеспечивает высокое входное сопротивление. Выходным каскадом является двухтактный

усилитель мощности с низким выходным сопротивлением (эмиттерный повторитель, работающий в режиме усиления *В* или *АВ*). В настоящее время ОУ проектируют по двухкаскадной схеме.

Операционный усилитель имеет два входа: инвертирующий (*И*) и неинвертирующий (*Н*). Их название связано с тем, что в первом случае выходное напряжение находится в противофазе с входным, а во втором случае – в фазе с входным напряжением. Для питания ОУ обычно используют два разнополярных источника питания $+U_n$ и $-U_n$ или один биполярный источник, а его среднюю точку соединяют с общей шиной (заземляют), относительно которой измеряются напряжения $+U_n$ и $-U_n$, равные $\pm 3\,\text{В}...\pm 15\,\text{В}$. Для получения нужных свойств к дополнительным выводам ОУ подключают звенья обратной связи.

## Характеристики и параметры ОУ

Без обратных связей ОУ не применяется из-за его большого коэффициента усиления (для идеального ОУ $K_u = \infty$; $R_{вх} = \infty$; $R_{вых} = 0$ и бесконечная полоса частот усиливаемого сигнала), вследствие чего даже незначительная асимметрия плеч входного дифференциального усилителя или весьма малое входное напряжение могут привести к насыщению ОУ (формированию на выходе ОУ напряжения, близкого по уровню к напряжению питания) и его неспособности обрабатывать входные сигналы.

Подключив звено отрицательной обратной связи (ООС), состоящее из двух резисторов (делителя), например, $R_{ос} \approx 200$ кОм и $R_1 \approx 5$ кОм между выходом и инвертирующим входом и соединив вход *Н* с общей точкой, получим инвертирующий усилитель (рис. 2, *а*) с фиксированным коэффициентом усиления, амплитудная характеристика которого $u_{вых} = f(u_{вх})$ изображена на рис. 2, *б*, на которой напряжение смещения $U_{см} = U_{вых.0}/K_{u.ос}$ (при $u_{вых} = 0$) есть приведенный к входу ОУ дрейф нуля $U_{вых.0}$ при $U_{вх} = 0$ от всех дестабилизирующих факторов.

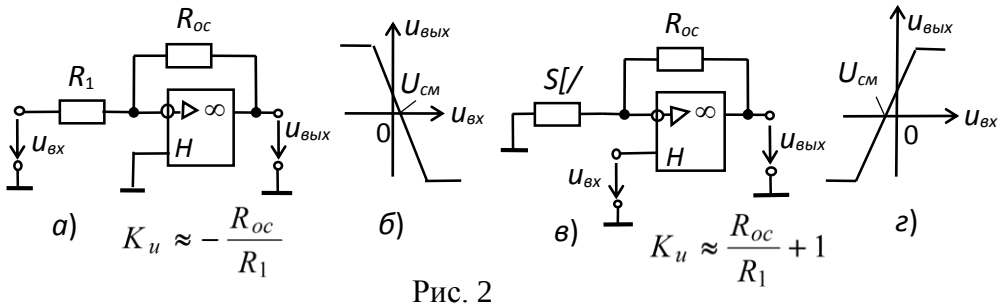



Рис. 2

Схема неинвертирующего усилителя и его амплитудная характеристика представлены на рис. 2, *в*, *г*.

Основными параметрами ОУ с ООС являются:

• коэффициент усиления напряжения $K_{u.oc} = \Delta u_{вых}/\Delta u_{вх}$, где $\Delta u_{вх}$ – разность потенциалов между входными выводами, и не зависит от коэффициента усиления самого ОУ ($K_u$ = $10^5 \ldots 10^6$). Для инвертирующего ОУ с ООС $K_{u.oc}$ приближенно определяется отношением сопротивлений резисторов $R_{oc}$ и $R_1$ звена ООС по напряжению, т. е. $K_{u.oc} \approx -R_{oc}/R_1$.

Коэффициент усиления неинвертирующего усилителя (см. рис. 2, *в*) $K_{u.oc} \approx R_{oc}/R_1 + 1$.

Максимальное значение напряжения, при котором нелинейные искажения пренебрежительно малы, $U_{вых.max} = K_u u_{вх} \approx (0{,}8...0{,}9)U_n$, т. е. меньше напряжения питания $U_n$ на 0,5 …3 В в зависимости от уровня $U_n$;

• входное сопротивление для разностного сигнала между входами ОУ на низкой частоте $R_{вх} \approx 10^3 \ldots 10^7$ Ом;

• выходное сопротивление $R_{вых} < 100$ Ом;

• входное напряжение смещения нуля $U_{см}$ (единицы милливольт) – дифференциальное напряжение, которое нужно приложить между входами ОУ, чтобы его выходное напряжение в отсутствие входных сигналов стало равно нулю;

• частота среза $f_в$, соответствующая спаду АЧХ ОУ на 3 дБ;

• частота единичного усиления $f_1$ (достигает сотен мегагерц), т. е. частота, при которой $K_u = 1$;

• скорость нарастания выходного напряжения ($v \approx 1 \ldots 100$ В/мкс) при подаче ступенчатого напряжения на вход и коротком замыкании выхода на инвертирующий вход;

• время установления выходного напряжения ($t_{уст}$ = 0,05…2 мкс) от 0,1 до 0,9 своего установившегося значения.

Одним из важных достоинств ОУ является подавление (ослабление) синфазного сигнала $u_{вх \cdot сф} = (u_{вх1} + u_{вх2})/2$, соответствующего равным по значению и одинаковым по знаку напряжениям, приложенным к обоим входам. Коэффициентом ослабления синфазного сигнала

$K_{ос.сф} = 20\lg(K_{u.oc}/K_{сф}) = 60 \ldots 120$ дБ,

где $K_{u.oc}$ – коэффициент усиления напряжения $u_{вх \cdot сф}$, приложенного между входными выводами ОУ, т. е. разностного напряжения $\Delta u = u_{вх1} - u_{вх2}$; $K_{сф} = u_{вых \cdot сф}/u_{вх \cdot сф}$ – коэффициент усиления напряжения $u_{вх \cdot сф}$, приложенного между общей шиной и каждым входом ОУ. Чем больше $K_{ос.сф}$, тем меньшую разность входных сигналов сможет различить ОУ на фоне большого синфазного напряжения.

Формирование напряжения на выходе ОУ в отсутствие входных сигналов (*дрейф нуля*) обусловлено неполной идентичностью напряжений эмиттерных переходов транзисторов входного дифференциального усилителя, изменением температуры окружающей среды, параметров источников питания, старением активных элементов схемы и т. п. Введением внешних цепей коррекции (балансировки), подключаемых к специально предусмотренным для этой цели выводам ОУ, можно компенсировать погрешности, обусловленные действием всех перечисленных выше дестабилизирующих факторов, приводящих к дрейфу нуля.

## Функциональные узлы на основе ОУ

На основе ОУ строят функциональные узлы для выполнения различных математических операций (рис. 3): *повторитель* (*а*), выходной сигнал которого практически равен входному, *интегратор* (*б*), выходной сигнал которого пропорционален интегралу по времени от его входного сигнала, *дифференциатор* (*в*), выходной сигнал которого пропорционален производной от его входного сигнала, *избирательный усилитель* (*г*), усиливающий входной сигнал в узкой полосе частот, *сумматор* (*д*), выходное напряжение которого равно инвертированной сумме входных напряжений, и др.

Параметры компонентов схемы определяют из условия получения приемлемой точности выполнения операций. Например, для уменьшения ошибки интегрирования и влияния входного тока и напряжения смещения параллельно конденсатору $C$ интегратора (см. рис. 3, *б*) подключают резистор, сопротивление которого значительно больше сопротивления $R_1$.

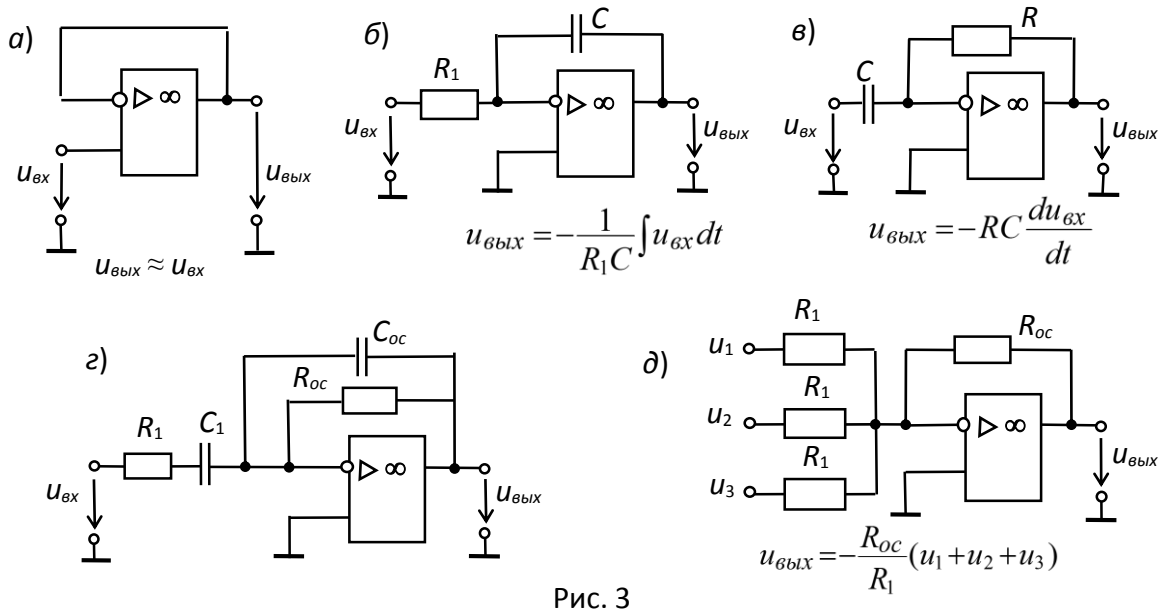



Рис. 3

С той же целью в дифференциаторе последовательно с конденсатором $C$ (см. рис. 3, *в*) включают резистор. Кроме того, при моделировании процессов интегрирования и дифференцирования входных сигналов (импульсов), исходя из свойств ОУ и скорости изменения входных импульсов, определяют допустимую максимальную длительность входного сигнала для интегратора и минимальную для дифференциатора.

Диапазон интегрирования реального интегратора ограничен снизу частотой сигнала $\omega_{сн} = 1/RC(K_u + 1)$, а сверху частотой $\omega_{св} = (K_u + 1)/\tau_{оу}$, где $\tau_{оу}$ – постоянная времени ОУ, а допустимое максимальное время интегрирования $t_{и.max} << \tau = RC$. При этом в интеграторе должны быть введены внешние цепи принудительного его обнуления, так как выходное напряжение интегратора равно

$$u_{вых} = U_{вх\cdot 0} + \frac{1}{C_{ос}}\int_0^t i_C dt = U_{вх.0} - \frac{1}{C_{ос}}\int_0^{t_и}\frac{u_{вх}}{R_1}dt\,,$$

где $U_{вх.0}$ – значение напряжения на зажимах конденсатора в момент начала новой волны интегрирования периодического сигнала.

На практике при интегрировании выбирают постоянную времени звена обратной связи $\tau = RC$, по крайней мере, в 10…100 раз больше длительности входного сигнала, а при дифференцировании её выбирают в 10…100 раз меньше длительности нарастания фронта входного сигнала и, тем более, существенно меньше его длительности.

## Генераторы на основе ОУ

*Мультивибратор* – релаксационный генератор, представляющий собой двухэлементный усилитель с ёмкостной связью, выход которого соединен с входом, формируя, тем самым, замкнутую цепь положительной обратной связи. Различают два вида мультивибраторов: *автоколебательные*, не обладающие состояниями устойчивого равновесия, и *ждущие* (одновибраторы), обладающие одним состоянием устойчивого равновесия, при выходе из которого сначала переходят в другое квазиустойчивое состояние, а затем самопроизвольно возвращаются в первоначальное состояние.

**Мультивибратор** можно собрать на операционном усилителе. В ОУ благодаря большому коэффициенту усиления ($K_u$ = $10^5$ - $10^6$) выходное напряжение пропорционально входному только при очень малых входных сигналах (единицы мили- и микровольт). Как отмечалось, при больших входных сигналах напряжение $u_{вых}$ может иметь два значения $U^+_{вых}$ и $U^-_{вых}$ (рис. 4, *а*).

Входные напряжения $u_{вх}$, при которых разность $u_{вх} - u_{ос} = 0$,

$$U_1 = U^-_{вых}\frac{R_1}{R_1+R_2} = \beta U^-_{вых};\ U_2 = U^+_{вых}\frac{R_1}{R_1+R_2} = \beta U^+_{вых},$$

где $u_{ос}$ – напряжение обратной связи; $\beta = R_1/(R_1+R_2)$ – коэффициент обратной связи (рис. 4, *б*, *в*).

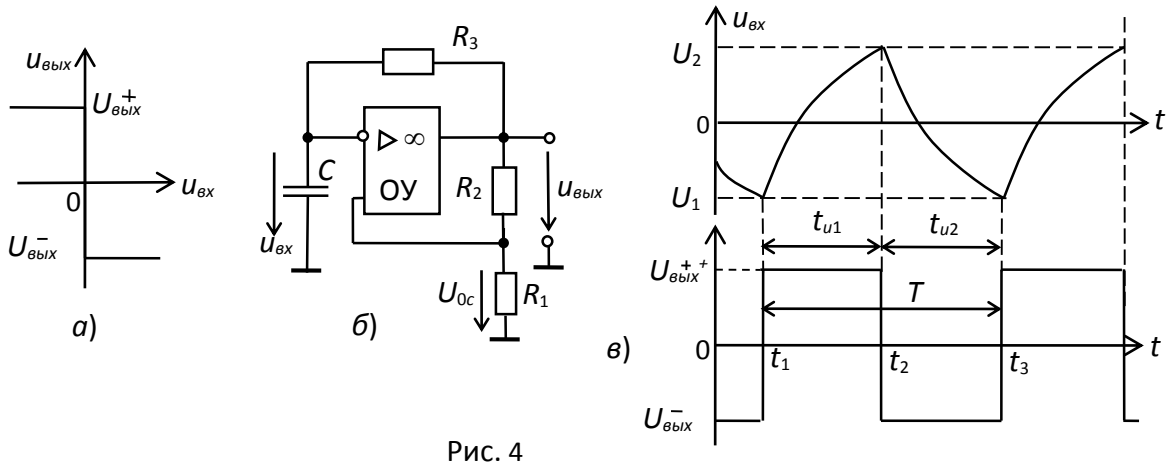



Рис. 4

В схеме автоколебательного мультивибратора (рис. 4, *б*) возникает режим самовозбуждения за счет второй обратной связи через $R_3C$-звено.

Предположим, что в момент $t_1$ (рис. 4, *в*) напряжение $u_{вых}$ изменилось скачком с $U^-_{вых}$ до $U^+_{вых}$. Конденсатор $C$ начинает перезаряжаться током,

протекающим через резистор $R_3$ под действием $U^{+}_{вых}$, причем напряжение на конденсаторе $u_C$ изменяется по экспоненциальному закону, стремясь к $U^{+}_{вых}$. Напряжение $u_C$ есть входное напряжение $u_{вх}$ инвертирующего усилителя, и когда в момент $t_2$ оно достигнет значения $U_2$, выходное напряжение ОУ скачком изменится с $U^{+}_{вых}$ на $U^{-}_{вых}$. Конденсатор начинает перезаряжаться, стремясь к $U^{-}_{вых}$, но, достигнув значения $U_1$ к моменту $t_3$, оно заставляет ОУ инвертировать выходное напряжение на $U^{+}_{вых}$. Далее процесс будет повторяться.

Генераторы, основанные на рассмотренном принципе, называют *релаксационными*. Период колебаний такого мультивибратора

$$T = 2R_3C\ln(1+2R_1/R_2),$$

причем $t_{и1} = t_{и2}$. Такой вид колебаний называют *меандром*.

**Генератор импульсов треугольной формы.** В схеме (рис. 5, *а*) *RC*-генератора треугольных импульсов входным напряжением $u_{вх}$ триггера,

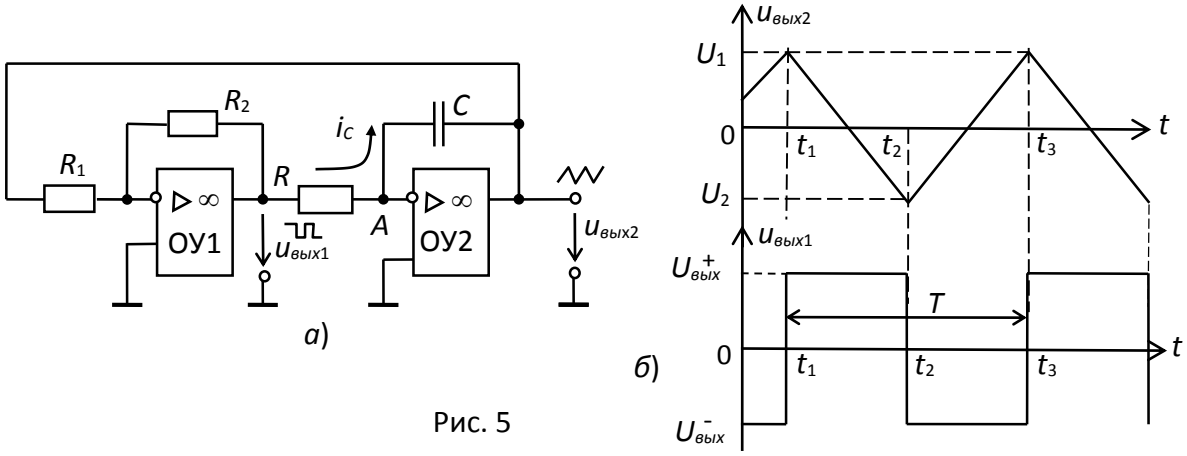



Рис. 5

выполненного на ОУ1, служит напряжение $u_{вых2}$, получаемое на инверторе – интеграторе, собранном на ОУ2.

Поясним работу интегратора. Ток $i_C$, проходящий через конденсатор $C$, равен $i_C = -C\dfrac{du_{вых2}}{dt}$, где $u_C = u_{вых2}$, так как потенциал точки $A$ (рис 5, *а*) близок к нулю. Ток связи между операционными усилителями ОУ1 и ОУ2 $i_C = u_{вых1}/R$. Проинтегрировав от 0 до $t$ и разделив на $-C$ обе части равенства $-C\dfrac{du_{вых2}}{dt} \approx \dfrac{u_{вых1}}{R}$, получим

$$u_{вых2} - u_{вых0} \approx -\frac{1}{RC}\int_0^t u_{вых}\,dt,$$

где $u_{вых0}$ – напряжение на генераторе при $t = 0$.

Пусть в момент времени $t_1$ (рис. 5, *б*) с триггера на вход ОУ2 подано напряжение $U^{+}_{вых}$. Так как $U^{+}_{вых} = const$ (а интеграл от постоянного значения пропорционален времени $t$), то напряжение $u_{вых2}$ изменяется по прямой линии до тех пор, пока в момент $t_2$ оно не достигнет значения $U_2$, при котором триггер переключится, и на вход интегратора будет подано напряжение $U^{-}_{вых}$. С момента $t_2$ конденсатор начнет перезаряжаться и напряжение на нем будет линейно возрастать до момента $t_3$, после чего процессы повторяются.

Амплитуда треугольного напряжения определяется напряжением переключения триггера и равна $|U_{вых1}| \cdot R_1/R_2$. Период колебаний $T = 4RCR_1/R_2$.

**Генератор синусоидальных колебаний.** На низких и средних частотах хорошим источником синусоидальных колебаний с малым уровнем искажений может служить генератор по схеме моста Вина.

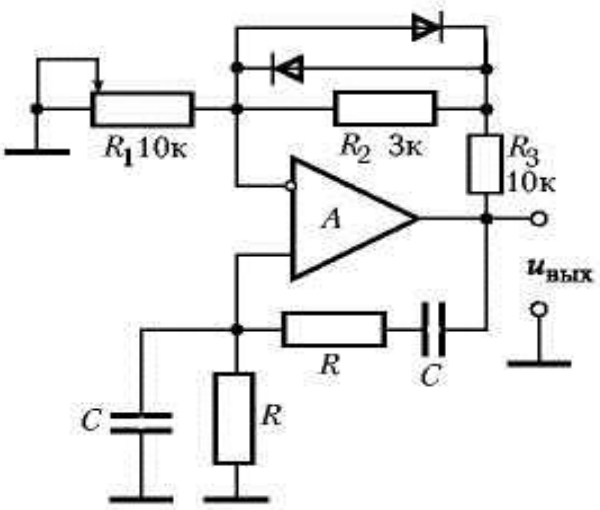



Рис. 6

Для одинаковых значений $R$ и $C$ частота колебаний равна:

$$f = \frac{1}{2\pi RC}.$$

Коэффициент усиления напряжения на неинвертирующем входе *ОУ* должен быть равен + 3, так как полосовой фильтр в цепи положительной обратной связи на центральной частоте имеет коэффициент передачи равный 1/3. При меньшем усилении колебания затухают, при большем — выходной

сигнал будет достигать насыщения. Искажение синусоиды мало, пока амплитуда колебаний не выходит за пределы линейного участка амплитудной характеристики усилителя. В схеме на рисунке 7 в качестве элемента обратной связи с переменным сопротивлением используется пара диодов. При изменении уровня выходного напряжения их сопротивление изменяется и поддерживает коэффициент усиления на уровне, соответствующем условию баланса амплитуд. Сопротивление $R_2$ предотвращает разрыв цепи отрицательной обратной связи при переходе выходного напряжения через ноль.

## Учебные задания и методические указания к их выполнению

### Задание 1. Изучение инвертирующего и неинвертирующего усилителей

1. Соберите усилители (на ОУ lm741h) с коэффициентами усиления, представленными в таблице 1 (напряжение сигнала 5мВ).
2. Измерьте коэффициенты усиления с помощью осциллографа.
3. В отчете приведите схемы и скриншоты осциллограмм, иллюстрирующие работу полученного устройства.

Таблица 1

| Вариант | Коэффициент усиления (расчетный) | | | Коэффициент усиления (измеренный) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | -10 | 10 | | | |
| 2 | 2 | -9 | 20 | | | |
| 3 | 3 | -8 | 30 | | | |
| 4 | 4 | -7 | 40 | | | |
| 5 | 5 | -6 | 100 | | | |
| 6 | 6 | -5 | 200 | | | |
| 7 | 7 | -4 | 300 | | | |
| 8 | 8 | -3 | 400 | | | |
| 9 | 9 | -2 | 500 | | | |
| 10 | 10 | -1 | 600 | | | |

### Задание 2. Изучение сумматора и вычитателя

1 Постройте сумматор и вычитатель.

2 Проведите с использованием устройств арифметические действия, указанные в таблице.

3 В отчете приведите скриншоты, иллюстрирующие работу полученного устройства.

Таблица 2

| Вариант | Арифметические действия | | |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 + 3 + 1 | 10 - 3 | 10 + 1 - 8 |
| 2 | 3 + 5 + 3 | 12 - 5 | 12 - 5 + 4 |
| 3 | 4 + 1 + 2 | 6 - 3 | 10 - 5 + 6 |
| 4 | 5 + 1 + 2 | 8 - 7 | 9 + 5 - 3 |
| 5 | 6 + 2 + 1 | 9 - 5 | 8 + 4 - 6 |
| 6 | 1 + 2 + 3 | 8 - 4 | 7 + 6 - 4 |
| 7 | 2 + 2 + 4 | 7 - 1 | 6 + 5 - 3 |
| 8 | 6 + 3 + 2 | 6 - 4 | 9 + 5 - 3 |
| 9 | 5 + 2 + 1 | 11 - 8 | 5 + 8 - 4 |
| 10 | 4 + 3 + 1 | 13 - 5 | 15 - 10 + 5 |

**Задание 3. Изучение дифференциального усилителя**

1 Постройте дифференциальный усилитель.

2 Получите на выходе напряжение, согласно данным таблицы 3 путем подбора сопротивлений.

4 Результаты занесите в таблицу. Приведите скриншоты, иллюстрирующие работу полученного устройства.

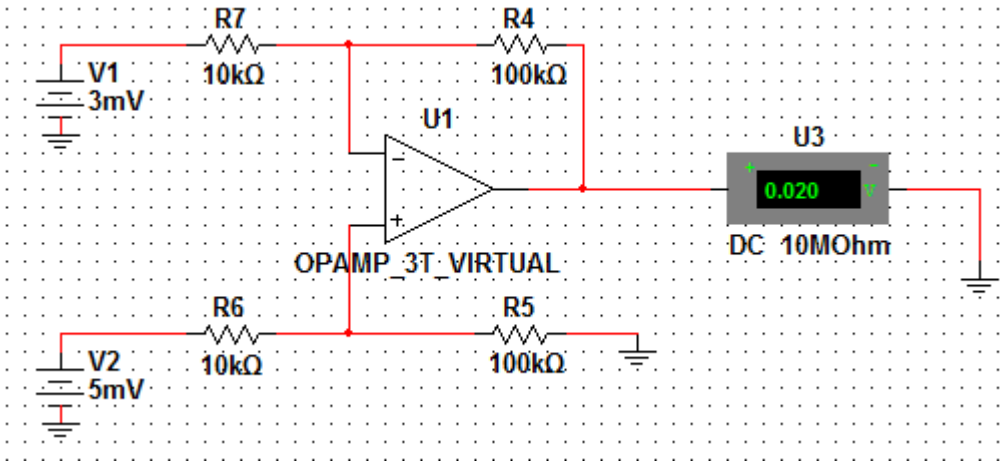


Таблица 3

| Вариант | $U_1$, *мВ* | $U_2$, *мВ* | $R_1$, *Ом* | $R_2$, *Ом* | $U_{вых}$, *В* |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 | 5 | | | 10 |
| 2 | 1 | 4 | | | 15 |
| 3 | 2 | 7 | | | 15 |
| 4 | 3 | 12 | | | 3 |
| 5 | 5 | 10 | | | 1 |
| 6 | 5 | 6 | | | 10 |
| 7 | 4 | 10 | | | 12 |
| 8 | 2 | 5 | | | 12 |
| 9 | 3 | 9 | | | 12 |
| 10 | 5 | 10 | | | 10 |

**Задание 4. Изучение интегратора**

1 Постройте интегратор. Сопротивление $R_2 = 10R_1$.

2 Исследуйте форму генерируемых сигналов в зависимости от емкости конденсатора в пределах 1нФ – 1мкФ. Приведите скриншоты работы генератора. Сделайте выводы.

3 Подберите значение емкости *C*, соответствующие предложенной частоте сигнала (таблица 4), обеспечивающее выполнение условия $U_{вх} = U_{вых}$. Результаты занесите в таблицу 4. Приведите скриншоты осциллограмм.

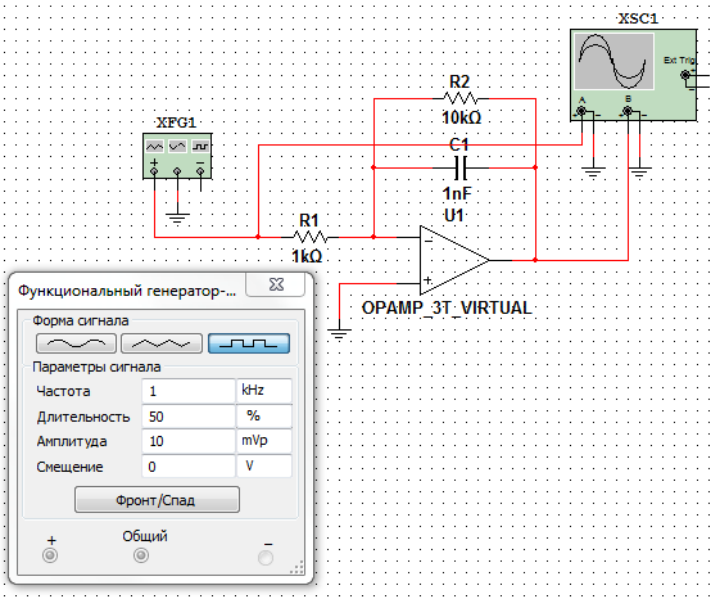


Таблица 4

| Вариант | *f, кГц* | *C, нФ* |
|---|---|---|
| 1 | 1 | |
| 2 | 2 | |
| 3 | 3 | |
| 4 | 4 | |
| 5 | 5 | |
| 6 | 6 | |
| 7 | 7 | |
| 8 | 8 | |
| 9 | 9 | |
| 10 | 10 | |

**Задание 5. Изучение релаксационного генератора**

1 Постройте генератор прямоугольных импульсов с частотой генерации согласно варианту (таблица 5).
2 Измерьте частоту генерации и сравните ее с теоретическим значением.
3 Измерьте время спадания фронта прямоугольного сигнала.
4 В отчете приведите скриншоты, иллюстрирующие работу полученного устройства.

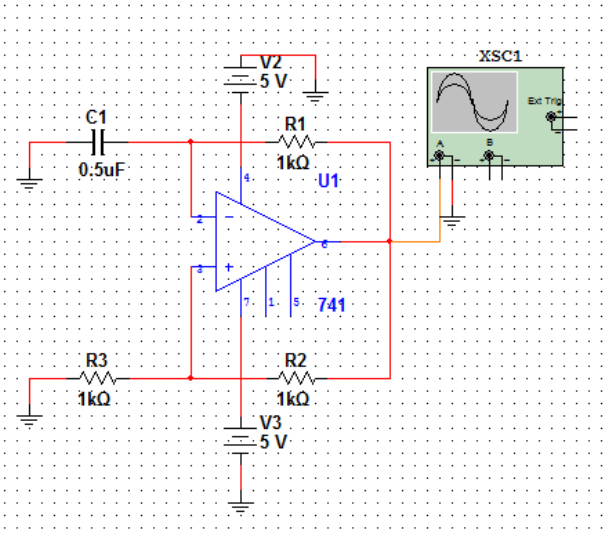


Таблица 5

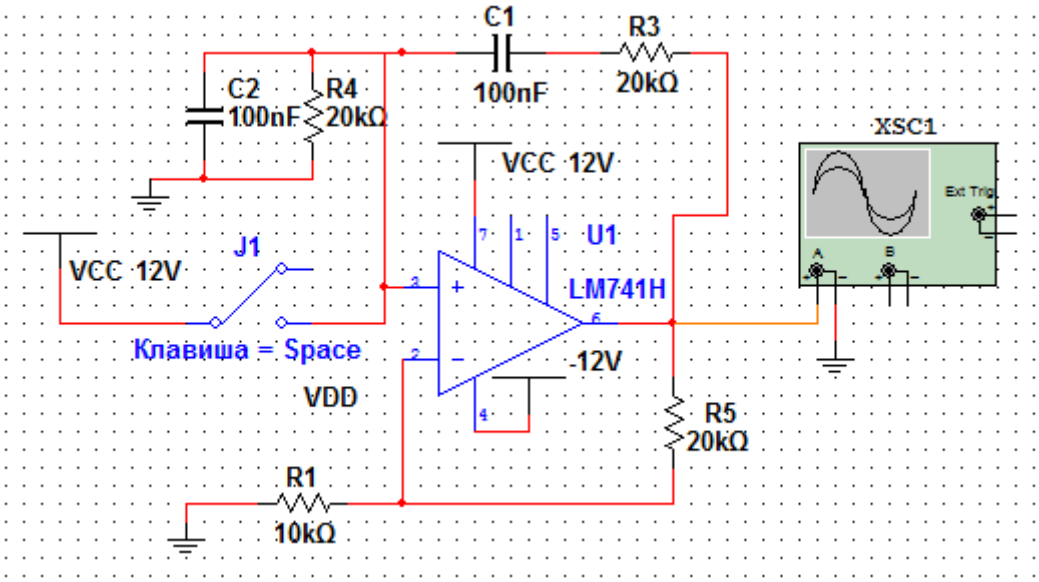
| Вариант | *f, кГц, расчетное значение* | *f, кГц, измеренное значение* | *Время спадания, t, с* |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | | |
| 2 | 2 | | |
| 3 | 3 | | |
| 4 | 4 | | |
| 5 | 5 | | |
| 6 | 6 | | |
| 7 | 7 | | |
| 8 | 8 | | |
| 9 | 9 | | |
| 10 | 10 | | |

**Задание 6**. **Изучение генератора синусоидальных колебаний**

1 Постройте генератор синусоидальных колебаний с частотой генерации согласно варианту (таблица 6) с цепочкой Вина (рисунок) на ОУ lm741h.
2 Измерьте частоту генерации и сравните ее с теоретическим значением.
3 В отчете приведите скриншоты, иллюстрирующие работу полученного устройства.

Таблица 6

| Вариант | *f, кГц, расчетное значение* | *f, кГц, измеренное значение* |
|---|---|---|
| 1 | 1 | |
| 2 | 2 | |
| 3 | 3 | |
| 4 | 4 | |
| 5 | 5 | |
| 6 | 6 | |
| 7 | 7 | |
| 8 | 8 | |
| 9 | 9 | |
| 10 | 10 | |




## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические схемы цепей, собранных на рабочем поле программной среды MS11.
3. Таблицы с расчётными и экспериментальными данными.
4. Графики зависимостей (по упражнениям).
5. Осциллограммы входных и выходных сигналов (по упражнениям).
6. Выводы по работе.