

## Лабораторная работа № 12

### Исследование операционных усилителей и схем на их основе

Цель работы – изучение принципа работы, основных параметров и характеристик операционного усилителя; измерение основных параметров операционного усилителя; исследование масштабных усилителей на операционных усилителях.

#### 12.1. Краткие теоретические сведения

Операционный усилитель (ОУ) – многокаскадный усилитель постоянного тока (УПТ) с дифференциальным входом, обладающий большим коэффициентом усиления, высоким входным и малым выходным сопротивлениями.

ОУ выполняется в виде интегральной микросхемы и является одним из основных элементов аналоговой схемотехники, на основе которого можно создавать самые разнообразные электронные устройства: усилители, генераторы, сумматоры, интеграторы, дифференциаторы, активные фильтры и др. Реализация различных устройств на базе ОУ значительно проще, чем на отдельных транзисторах.

Операционные усилители имеют один выход и два входа: *инвертирующий* и *неинвертирующий*. В большинстве случаев сигнал подается на один из входов, а второй вход соединяется с нулевым проводом. При этом, если сигнал подается на инвертирующий вход, то помимо усиления осуществляется его инвертирование (изменение знака). Питание ОУ обычно осуществляется *двухполярным (биполярным) напряжением*, которое подводится к соответствующим выводам ( $+U_{п}$  и  $-U_{п}$ ). Кроме того, ОУ может иметь выводы *FC* для подключения цепей частотной коррекции и выводы *NC* – для подключения элементов начальной балансировки (установки нуля на выходе при нулевом входном сигнале).

Условное графическое обозначение ОУ на принципиальных схемах приведено на рис. 12.1а. Его выполняют в виде прямоугольника с дополнительными полями, в которых указывают назначение выводов. Инвертирующий вход обозначается знаком «0» или «-».

При построении конкретного электронного устройства различаются только способы подключения входов и выхода ОУ. Поэтому на функциональных схемах используется упрощенное обозначение, содержащее только три указанных вывода (рис. 12.1б,в). Подключение остальных выводов, как правило, соответствует типовой схеме включения, т.е. цепи коррекции и балансировки для конкретного ОУ являются типовыми и приводятся в справочниках. В качестве примера на рисунке 12.2 приведена одна из схем включения операционного усилителя К140УД6. Некоторые типы ОУ не требуют внешних цепей коррекции и балансировки.

Внутренняя структура ОУ обычно представлена тремя составными частями, имеющими определенное функциональное назначение. Входным каскадом является дифференциальный усилитель. Он обладает высоким входным сопротивлением, имеет

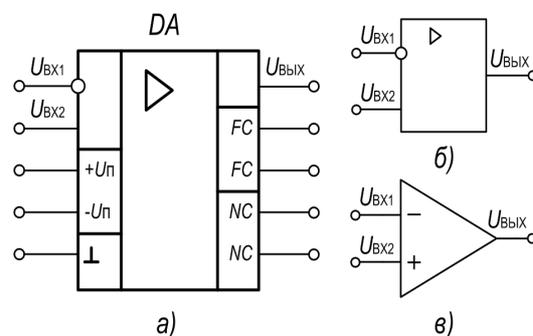


Рис. 12.1 Условное графическое обозначение ОУ на схемах.

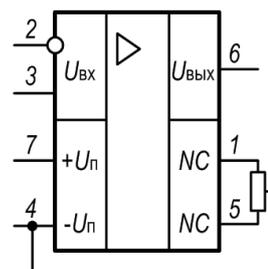


Рис. 12.2. Схема включения ОУ К140УД6

большой коэффициент усиления по отношению к разности входных сигналов и низкий коэффициент усиления по отношению к одинаковым (синфазным) сигналам на входах. Он также в значительной степени ослабляет влияние изменений температуры и напряжения питания на выходной сигнал. *Промежуточные каскады* (один или несколько) обеспечивают необходимое усиление сигнала по току и напряжению, а также согласование выходного и входного сопротивлений предыдущего и последующего каскадов. *Выходной каскад*, который, как правило, выполняется по двухтактной схеме, обеспечивает требуемое усиление сигнала по мощности.

В зависимости от типа ОУ схемы построения каскадов могут иметь свои особенности, а число промежуточных каскадов может быть различным. Однако внутренняя структура ОУ и функциональное назначение отдельных каскадов при этом не изменяются. На рисунке 12.3 приведен один из типовых вариантов схемы ОУ.

На транзисторах  $VT1, VT2$  выполнен дифференциальный усилитель. Для задания эмиттерного тока транзисторов  $VT1, VT2$  используется источник стабильного тока на транзисторах  $VT3$  и  $VT4$ , выполненный по схеме «токавого зеркала». Резисторы  $R_{Э1}$  и  $R_{Э2}$  компенсируют отличия входных характеристик транзисторов  $VT1, VT2$  и увеличивают входное сопротивление усилителя за счет местной последовательной ООС по току нагрузки каждого из транзисторов.

В качестве промежуточных каскадов используются дифференциальный усилитель на транзисторах  $VT5$  и  $VT6$  и усилитель, выполненный по схеме ОЭ на транзисторе  $VT7$ . Они обеспечивают дальнейшее усиление сигнала по току, а также усиление по напряжению до требуемого уровня. Температурная стабилизация тока  $VT7$  обеспечивается введением ООС по току нагрузки с помощью резистора  $R_{Э4}$ .

В выходном каскаде ОУ используется двухтактный усилитель мощности на транзисторах  $VT8$  и  $VT9$ , работающий в режиме класса усиления  $AB$ . Начальный ток транзисторов задаётся напряжением смещения диодов  $VD1$  и  $VD2$ . Эти же диоды обеспечивают и температурную стабилизацию тока покоя выходного усилителя. Резисторы  $R_{Э5}$  и  $R_{Э6}$  компенсируют влияние неидентичности параметров комплементарной пары транзисторов  $VT8, VT9$ .

Вывод  $U_{КОР}$  используется для подключения элементов частотной коррекции.

Свойства ОУ определяются его статическими и динамическими характеристиками.

Статические передаточные характеристики ОУ представлены на рисунке 12.4. Они получены при подаче сигнала на один из входов и нулевом сигнале на

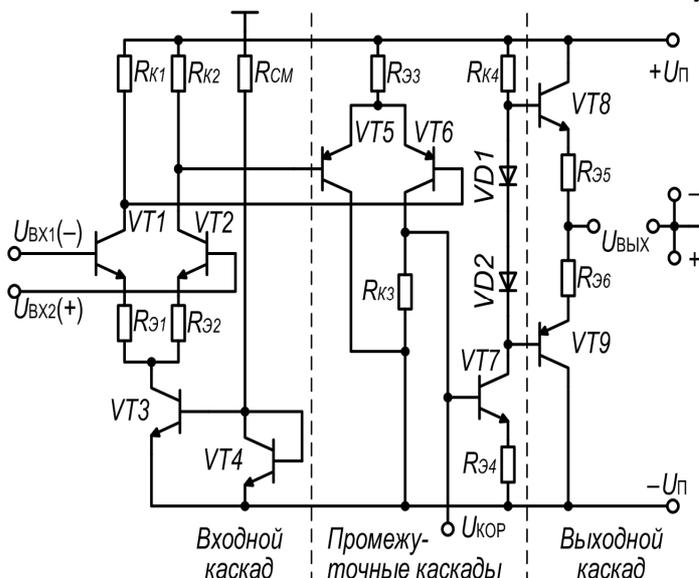


Рис. 12.3 Упрощённая схема трехкаскадного ОУ

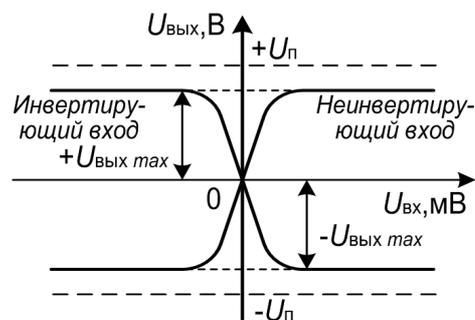


Рис. 12.4 Передаточные характеристики ОУ

другом входе. Характеристики имеют горизонтальный и наклонный участки.

Наклонный участок каждой кривой соответствует области линейного усиления сигнала. На этом участке выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{У0}} \cdot U_{\text{ВХ}}$ , где  $K_{\text{У0}}$  – коэффициент усиления ОУ без обратной связи,  $U_{\text{ВХ}}$  – входное напряжение.

Горизонтальные участки кривых соответствуют области насыщения, в которой  $U_{\text{ВЫХ}}$  принимает одно из предельных значений  $+U_{\text{ВЫХ max}}$  либо  $-U_{\text{ВЫХ max}}$ . Этими значениями ограничивается амплитуда выходного сигнала. Режим насыщения достигается при  $K_{\text{У0}} \cdot U_{\text{ВХ}} > U_{\text{ВЫХ max}}$ . По абсолютному значению  $U_{\text{ВЫХ max}}$  обычно на 2...3 В меньше напряжений питания  $U_{\text{П}}$ . При  $U_{\text{П}} = \pm 15$  В диапазон изменения  $U_{\text{ВЫХ}}$  близок к  $\pm 12$  В. При расчёте обычно принимают  $U_{\text{ВЫХ max}} = 2/3 U_{\text{П}}$ , для того чтобы ОУ гарантированно работал в линейной области.

К динамическим относятся *переходные* и *частотные характеристики* ОУ.

На практике при выборе ОУ и расчёте построенных на их основе схем руководствуются основными параметрами, которые приводятся в справочниках. К ним относятся:

- коэффициент усиления по напряжению  $K_{\text{У0}}$  характеризует способность ОУ усиливать подаваемый на его входы дифференциальный сигнал (обычно  $10^3 \dots 10^6$ );
- входное сопротивление  $R_{\text{ВХ0}}$  – сопротивление ОУ по отношению к входному сигналу. Различают *дифференциальное входное сопротивление*  $R_{\text{ВХ.диф.}}$ , т.е. сопротивление между двумя входными выводами, и *синфазное входное сопротивление*  $R_{\text{ВХ.синф.}}$ , т.е. сопротивление между объединёнными входными выводами и «землёй». Обычно в справочниках приводится значение только дифференциального входного сопротивления, которое в 10...100 раз меньше синфазного и составляет  $10^4 \dots 10^{10}$  Ом;
- выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ.0}}$  – внутреннее сопротивление ОУ, рассматриваемого по отношению к нагрузке как эквивалентный источник ЭДС (для большинства ОУ 10...1000 Ом);
- входное напряжение смещения  $U_{\text{см}}$  характеризует разбаланс и несимметрию входного дифференциального каскада ОУ и численно равно постоянному напряжению, которое необходимо приложить к входу ОУ, чтобы его выходное напряжение стало равным нулю (как правило 1...10 мВ);
- входной ток  $I_{\text{ВХ}}$  (входной ток смещения) – ток на входах ОУ, необходимый для работы входного каскада (менее 10 мкА);
- разность входных токов  $\Delta I_{\text{ВХ}}$  (ток сдвига) – разность входных токов смещения, которая появляется вследствие неодинаковых коэффициентов передачи тока  $h_{21Э}$  транзисторов входного каскада ОУ (менее 1 мкА);
- коэффициент ослабления синфазного сигнала ( $K_{\text{ос.сф.}}$ ) характеризует способность ослаблять синфазные (приложенные к двум входам одновременно) сигналы (обычно составляет 50...120 дБ).

Динамические свойства ОУ обычно характеризуются двумя параметрами:

- предельной частотой ( $F_{\text{max}}$ ), на которой модуль коэффициента усиления равен 1 или частотой единичного усиления ( $F_1$ ), что то же самое;
- максимальной скоростью нарастания выходного напряжения ( $V_{U_{\text{ВЫХ}}}$ ), которая измеряется при подаче на вход ОУ напряжения ступенчатой формы амплитудой более 0,1 В (для большинства ОУ ~0,1...10 В/мкс).

Применение ОУ весьма разнообразно. Однако следует отметить, что во всех случаях ОУ используется с цепями отрицательной обратной связи (ООС), снижающими его коэффициент усиления. Без этого нормальная работа устройства невозможна. Цепи ООС могут быть построены на резисторах, либо с использованием реактивных элементов. В последнем случае ООС является частотно зависимой. Таким образом, использование соответствующих цепей ООС позволяет обеспечить требуемую функциональную зависимость между входным и выходным сигналами.

Если параметры цепи ООС выбрать так, чтобы проходящие по ней токи были на 1...2 порядка больше входных токов ОУ, то влияние параметров последнего на свойства устройства будет незначительно, т.е. функциональная зависимость между входным и выходным сигналами будет определяться главным образом цепью ООС. Выбор параметров цепей ООС при построении устройств на ОУ обычно осуществляют с учетом указанного условия. Для этого принимают сопротивление в цепи ООС

$$R_{OC} \leq \frac{2\delta \cdot U_{II}}{3I_{BX}}, \quad (12.1)$$

где  $\delta$  – допустимая погрешность от влияния входного тока ОУ (обычно  $10^{-4} \dots 10^{-3}$ ).

Инвертирующий усилитель обеспечивает усиление сигнала по мощности с изменением знака (инвертированием). Его схема приведена на рисунке 12.5. В этой схеме входной сигнал подаётся на инвертирующий вход ОУ, а его неинвертирующий вход соединен с нулевым проводом. При выполнении условия (12.1) с достаточной точностью можно считать, что коэффициент усиления по напряжению

$$K_U \approx -\frac{R_{OC}}{R_1}, \quad (12.2)$$

а выходное напряжение  $U_{ВЫХ} = K_U \cdot U_{ВХ}$ .

Включение резистора  $R_{КОР}$ , имеющего сопротивление

$$R_{КОР} = \frac{R_1 R_{OC}}{R_1 + R_{OC}}, \quad (12.3)$$

повышает точность работы схемы за счет компенсации влияния входных токов  $I_{BX}$  ОУ.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя  $R_{ВХ} \approx R_1$ .

Если  $R_1 = R_{OC}$ , то  $K_U = -1$  и получаем схему инвертирующего повторителя напряжения (инвертора), у которого  $U_{ВЫХ} = -U_{ВХ}$ .

Неинвертирующий усилитель обеспечивает усиление сигнала без изменения знака (рис. 12.6а). В этой схеме входной сигнал подаётся на неинвертирующий вход ОУ, а на его инвертирующий вход с помощью делителя выходного напряжения, выполненного на резисторах  $R_1$  и  $R_{OC}$ , подаётся напряжение ООС. Коэффициент усиления неинвер-

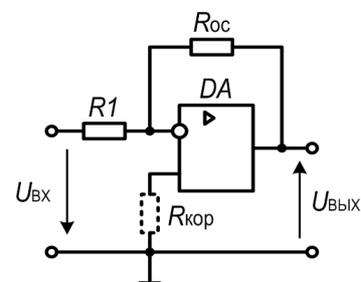


Рис. 12.5 Инвертирующая схема включения ОУ

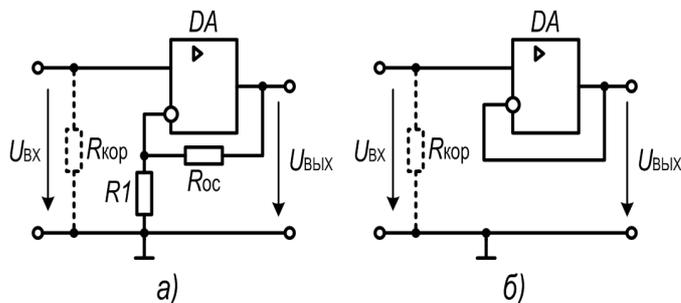


Рис. 12.6 Неинвертирующие схемы включения ОУ:

а – усилитель; б – повторитель

тирующего усилителя по напряжению

$$K_U \approx 1 + \frac{R_{OC}}{R_1}, \quad (12.4)$$

при этом  $R_{OC}$  выбирается исходя из условия (12.1).

При выполнении условия  $R_{OC} = 0$  и  $R_1 \rightarrow \infty$  получаем схему неинвертирующего повторителя напряжения с  $K_U \approx 1$ , т.е.  $U_{ВЫХ} \approx U_{ВХ}$  (рис. 12.6). Входное сопротивление повторителя напряжения на ОУ может составлять  $10^7 \dots 10^{12}$  Ом, а выходное – доли Ом.

Для повышения точности работы ОУ включают резистор  $R_{КОР}$ , сопротивление которого определяется по формуле (12.3), однако включение этого резистора приводит к уменьшению входного сопротивления усилителя, т.к. в этом случае  $R_{ВХ} \approx R_{КОР}$ .

Инвертирующий сумматор может быть построен на основе инвертирующего усилителя (рис. 12.7а) путем добавления соответствующего числа входов. При этом

$$U_{ВЫХ} = - \left( U_{ВХ1} \frac{R_{OC}}{R_1} + U_{ВХ2} \frac{R_{OC}}{R_2} + U_{ВХ3} \frac{R_{OC}}{R_3} \right), \quad (12.5)$$

если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_{OC}$ , то  $U_{ВЫХ} = -(U_{ВХ1} + U_{ВХ2} + U_{ВХ3})$ .

Если ОУ работает в нелинейном режиме, то приведённые соотношения не справедливы.

Дифференциальный усилитель представляет собой сочетание инвертирующего и неинвертирующего включения ОУ (рис. 12.7б). Входные напряжения  $U_{ВХ1}$  и  $U_{ВХ2}$  подаются соответственно на инвертирующий и неинвертирующий входы.

Выходное напряжение данной схемы

$$U_{ВЫХ} = -U_{ВХ1} \frac{R_{OC}}{R_1} + U_{ВХ2} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \left( 1 + \frac{R_{OC}}{R_1} \right), \quad (12.6)$$

если  $R_{OC}/R_1 = R_3/R_2$ , то  $U_{ВЫХ} = (-U_{ВХ1} + U_{ВХ2}) \frac{R_{OC}}{R_1}$ .

Следовательно, выходное напряжение такого устройства прямо пропорционально разности входных напряжений.

Многоходовый сумматор-вычитатель (рис.12.8) обеспечивает выходной сигнал, пропорциональный линейной комбинации нескольких входных сигналов, подаваемых на оба входа.

Выходное напряжение данной схемы

$$U_{ВЫХ} = -U_1 \frac{R_{OC}}{R_1} - U_2 \frac{R_{OC}}{R_2} - \dots - U_N \frac{R_{OC}}{R_N} + \left( U'_1 \frac{R_{OC}}{R'_1} + U'_2 \frac{R_{OC}}{R'_2} + \dots + U'_M \frac{R_{OC}}{R'_M} \right) \times A, \quad (12.7)$$

где  $A = \frac{1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_N + 1/R_{OC} \left[ +1/R_{ДОП} \right]}{1/R'_1 + 1/R'_2 + \dots + 1/R'_M + 1/R' \left[ +1/R'_{ДОП} \right]}$ , выраже-

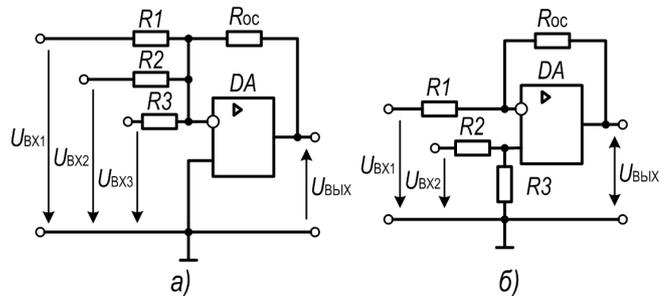


Рис. 12.7 Инвертирующий сумматор (а) и дифференциальный усилитель (вычитатель) (б)

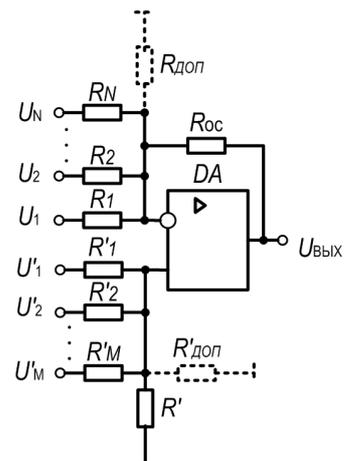


Рис.12.8 Сумматор - вычитатель

ния в квадратных скобках принимаются во внимание только при включении соответствующих резисторов. Расчёт схемы (рис.2) производится следующим образом.

Вначале выбирается значение  $R_{OC}$ . После этого, исходя из заданных коэффициентов усиления для различных сигналов, определяют сопротивления входных резисторов. Значение сопротивления резистора  $R'$  обычно принимается равным значению  $R_{OC}$ . Схема считается сбалансированной, когда  $A=1$ . Для обеспечения этого равенства в цепь инвертирующего входа включается резистор  $R_{доп}$ , если числитель  $A$  меньше знаменателя, в противном случае в цепь неинвертирующего входа (параллельно  $R'$ ) включается резистор  $R'_{доп}$ . В любом случае значение сопротивления дополнительного резистора рассчитывается по формуле:

$$R_{доп} = \frac{1}{1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_N + 1/R_{OC} - (1/R'_1 + 1/R'_2 + \dots + 1/R'_M + 1/R')}. \quad (12.8)$$

## 12.2. Порядок выполнения работы.

- i Тип операционного усилителя задаётся преподавателем.
- i Для всех исследуемых схем напряжение питания ОУ  $U_{п} = \pm 15$  В.

### Задание 1: Определение основных параметров операционных усилителей

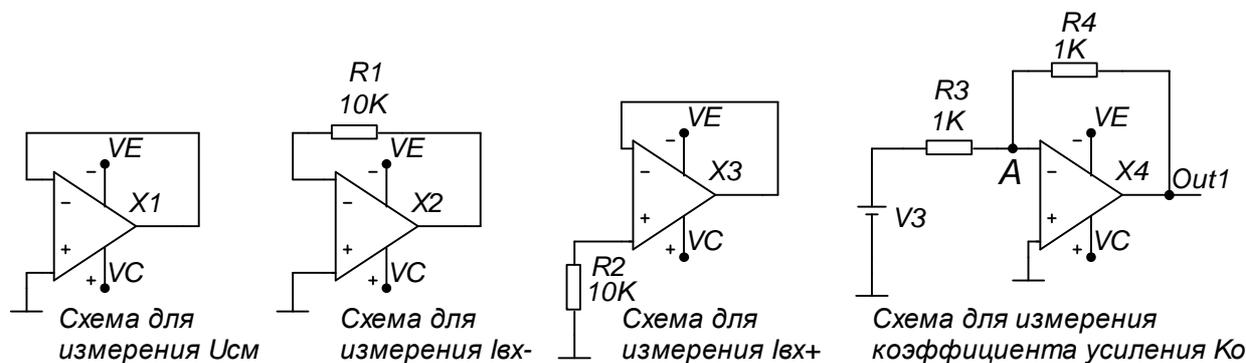


Рис.12.9 Схемы включения операционного усилителя для измерения его основных параметров

- а) собрать схемы, представленные на рис. 12.9;
- б) провести соответствующие измерения и рассчитать основные параметры операционного усилителя следующим образом:

$$I_{ВХ-} \text{ рассчитывается по формуле } I_{ВХ-} = \frac{U_{ВЫХ} - U_{СМ}}{R1};$$

$$I_{ВХ+} \text{ рассчитывается по формуле } I_{ВХ+} = \frac{U_{ВЫХ} - U_{СМ}}{R2};$$

$$K_0 = \frac{U_{ВЫХ}}{U_A - U_{СМ}}, \text{ где } U_A \text{ - потенциал точки А относительно «земли»}.$$

### Задание 2: Исследование инвертирующего усилителя

- а) собрать схему инвертирующего усилителя (рис. 12.5);
- б) задать значение сопротивлений  $R_1 = 1$  кОм и нагрузки  $R_H = 10$  кОм;
- в) подать на вход усилителя синусоидальный сигнал с амплитудным значением напряжения  $U_{ВХ} = 5$  мВ и частотой  $f = 10$  кГц;
- г) задавая значения сопротивления  $R_{OC} = 1; 2; 5; 10; 100$  и  $1000$  кОм определить амплитудные значения выходного напряжения  $U_H$ ;
- д) по результатам эксперимента вычислить коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  и

сравнить с теоретическим значением  $K_U$ , рассчитанным по формуле (12.2);

е) результаты измерений и расчётов свести в таблицу;

ж) построить расчётную и экспериментальную кривые  $K_U = f(R_{OC})$  и объяснить возможные расхождения;

з) получить ЛАЧХ исследуемой схемы в диапазоне частот от 1 Гц до 10 МГц при  $R_{OC} = 1000$  кОм и определить частоту единичного усиления  $F_1$  (частота, на которой модуль коэффициента усиления  $K_U = 1$ ).

#### **Задание 3: Исследование неинвертирующего усилителя**

а) собрать схему инвертирующего усилителя (рис. 12.6) и выполнить измерения аналогично пунктам а) – з) Задания 2 при тех же значениях входного напряжения и сопротивлений  $R_{OC}$ ;

б) по результатам эксперимента вычислить коэффициент усиления по напряжению  $K_U$  и сравнить с теоретическим значением  $K_U$ , рассчитанным по формуле (12.4);

в) результаты измерений и расчётов свести в таблицу;

г) построить расчётную и экспериментальную кривые  $K_U = f(R_{OC})$  и объяснить возможные расхождения.

#### **Задание 4: Исследование дифференциального усилителя**

а) собрать схему дифференциального усилителя (рис. 12.7б), подключить ко входам источника э.д.с. с заданными значениями  $U_{BX1}$  и  $U_{BX2}$ ;

б) рассчитать по формуле (12.6) сопротивления резисторов для обеспечения заданного преподавателем  $K_{U1} = K_{U2}$  (принять  $R_{OC} = 100$  кОм);

в) определить выходное напряжение  $U_{ВЫХ}$  и сравнить с рассчитанным по формуле (12.6) значением.

#### **Задание 5: Исследование сумматора-вычитателя**

а) собрать схему (рис. 12.8) для выполнения операции

$$U_{ВЫХ} = -K_{U1} U_1 - \dots - K_{UN} U_N + K'_{U1} U'_1 + \dots + K'_{UM} U'_M;$$

рассчитать сопротивления резисторов для обеспечения заданных преподавателем  $K_{U1}$ ,  $K_{U2}$ ,  $K_{U3}$ , ... (принять  $R_{OC} = 100$  кОм);

б) определить расчётным и экспериментальным способом  $U_{ВЫХ}$  при заданных значениях  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ , ... и сравнить их (вычислить расхождение).

### 12.3. Контрольные вопросы

1. Какие выводы содержит ОУ и для чего они предназначены?
2. Из каких каскадов состоит операционный усилитель?
3. Какими основными параметрами характеризуется ОУ.
4. В чём причина возникновения напряжения смещения и входных токов в ОУ?
5. Чем ограничивается выходное напряжение ОУ?
6. Почему для работы ОУ необходимо наличие цепей ООС и в чём их назначение?
7. Как измеряются основные параметры ОУ?
8. Как рассчитываются коэффициенты усиления для различных схем включения ОУ?