



Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

## **Исследование погрешностей схем на операционных усилителях**

Методические указания  
по выполнению лабораторной работы № 8 по курсу  
“Проектирование средств измерений и контроля”

ТОМСК 2022

## Цель работы

Изучить погрешности, характерные для операционных усилителей. Получить навыки компьютерного моделирования измерительных схем на операционных усилителях с использованием программы компьютерного моделирования Multisim.

## 1. Исследование погрешностей схем на операционных усилителях

### 1.1. Общие сведения об операционных усилителях

Операционными усилителями (ОУ) называются усилители постоянного тока с большим коэффициентом усиления, предназначенные для работы с глубокой обратной связью. Это обеспечивает параметры схем на ОУ определяемые характеристиками элементов, включенных в цепь обратной связи. Обозначение ОУ на схемах приведено на рис. 1а, а внешний вид некоторых из них – на рис. 1б.

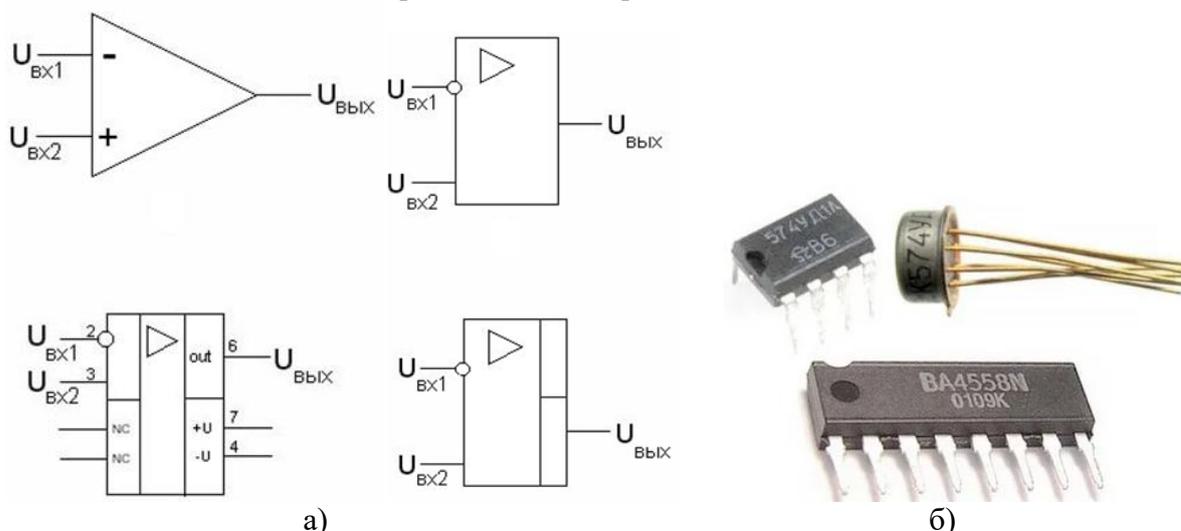


Рис. 1. Обозначение на схемах (а) и внешний вид (б) операционных усилителей

ОУ имеет как минимум пять внешних цепей: вход инвертирующий (обозначен «-») с напряжением  $V_{I1}$ ; вход не инвертирующий (обозначен «+») с напряжением  $V_{I2}$ ; выходная цепь с напряжением  $V_{OUT}$ ; цепи напряжений электропитания  $V^+$  и  $V^-$ . Работа ОУ описывается выражением:

$$V_{OUT} = A(V_{I1} - V_{I2}). \quad (1)$$

Идеальный ОУ обладает следующими свойствами:

- коэффициент усиления бесконечно велик ( $A \rightarrow \infty$ );
- полоса пропускаемых частот усиливаемого сигнала бесконечно велика ( $f_C \rightarrow \infty$ );
- входное сопротивление бесконечно велико ( $R_I \rightarrow \infty$ );
- выходное сопротивление бесконечно мало ( $R_U \rightarrow 0$ );
- выходное напряжение  $V_U$  равно нулю при нулевом напряжении  $V_I$  на входе.

Реальные ОУ отличаются от идеальных. Они характеризуются следующими параметрами:

1. **Коэффициент усиления ОУ ( $A$ )** который в современных ОУ достигает десятков, а иногда и сотен тысяч. Коэффициент усиления ОУ без цепей обратной связи зависит от сопротивления нагрузки, температуры окружающей среды, напряжения питания и др.

2. **Входное сопротивление ( $R_I$ ).** В зависимости от способа подачи входного сигнала в ОУ с инвертирующим и не инвертирующим дифференциальными входами различают дифференциальное входное сопротивление и входное сопротивление для синфазных сигналов. Дифференциальное входное сопротивление измеряется между дифференциальными входами ОУ. Оно имеет величину от нескольких кОм до нескольких МОм. Входное сопротивление для синфазного сигнала определяется между замкнутыми

накоротко входами ОУ и заземляющей шиной. Входное сопротивление для синфазных сигналов обычно очень велико и составляет десятки МОм.

3. **Выходное сопротивление ( $R_U$ )** – это сопротивление ОУ, измеренное со стороны подключения нагрузки. Для разных типов ОУ находится в пределах от 10 до 2000 Ом. Величина выходного сопротивления определяет максимальную силу выходного тока ( $I_{Umax}$ ).

4. **Полоса пропускания** определяется частотной характеристикой ОУ, т. е. зависимостью его коэффициента усиления  $A$  от частоты  $F$  входного сигнала. Идеализированная частотная характеристика ОУ предполагает снижение  $A$  на 3 дБ при частотах усиливаемого сигнала от 0 Гц до частоты среза  $f_C$ . При дальнейшем росте частоты сигнала коэффициент усиления снижается до значения равного единице на частоте единичного усиления  $f_U$ . С повышением частоты уменьшается предельно достижимая амплитуда выходного сигнала ОУ. При этом сохраняется неизменной **скорость нарастания выходного напряжения ( $S_R$ )**. Максимальная величина  $S_R$  современных ОУ находится в пределах 0,3 – 50 В/мкс.

5. **Напряжение смещения нуля ( $V_{OS}$ )** это величина напряжения, приложенного между входами усилителя, необходимого для получения нулевого напряжения на выходе ОУ. Основную долю этого напряжения составляет разность напряжений база-эмиттер входных транзисторов дифференциального каскада. Напряжение смещения зависит от температуры и напряжения источников питания. Типичная паспортная величина напряжения смещения нуля 1 – 50 мВ. Величина дрейфа 1 – 50 мкВ /°С. Для **компенсации смещения уровня выходного сигнала** во многих ОУ предусматривается балансировка с помощью подключения подстроечного резистора. Подстройка нулевого выходного сигнала производится при заземленных входах ОУ.

6. **Входные токи ОУ** вызваны входным сопротивлением реального ОУ. Для характеристики входных токов используются два параметра: начальный входной ток ( $I_{BS}$ ), определяемый входным сопротивлением ОУ. Его величина составляет 0,1 – 100 мкА; начальный разностный входной ток ( $I_{OS}$ ), определяемый разностью начальных входных токов каждого из входов усилителя. Величина разностного тока составляет 0.01 – 10 мкА.

Входные токи усилителя протекают по внешним цепям каждого из его входов через сопротивление соответствующего источника сигнала. Если эти сопротивления неодинаковы, то разность падения напряжения на них вызывает смещение напряжения на выходе ОУ. Для исключения этой погрешности необходимо при проектировании схем с ОУ стремиться к выравниванию сопротивлений, включенных между входами усилителя и землей.

7. **Коэффициент подавления синфазных сигналов ( $S_R$ )**. При подаче на входы идеального ОУ одинаковых (синфазных) сигналов  $V_{I1} = V_{I2}$  выходное напряжение должно отсутствовать ( $V_{OUT} = 0$ ). У реальных ОУ это не выполняется и появляется напряжение  $\Delta V_{OUT}$ . Вызываемые этим погрешности характеризуются величиной коэффициента подавления синфазного сигнала

$$S_R = 20 \cdot \log \frac{2V_{OUT}}{V_{I1} + V_{I2}}. \quad (2)$$

Реальные ОУ имеют величину коэффициента подавления синфазного сигнала  $S_R = 60 - 100$  дБ.

8. **Собственный уровень шума усилителя**. Источником шума в ОУ, как и во всех электронных устройствах, является хаотическое движение носителей заряда. Хаотическое движение возникает либо под действием тепла, либо вызывается дискретностью носителей заряда. Первые из них называют тепловыми шумами, вторые – дробовыми.

Шум на выходе ОУ обычно измеряется в виде напряжения. Он генерируется как источниками напряжения, так и источниками тока. Внутренний шум усилителя можно разделить на четыре категории:

- приведенное к входу шумовое напряжение;
- приведенный к входу шумовой ток;

- фликкер- шум, возрастающий на 3-5 дБ на октаву при снижении частоты;
- попкорн-шум. Это внезапный скачок тока или напряжения смещения, длящийся несколько миллисекунд и имеющий амплитуду от единиц до сотен мкВ. Имеет случайный характер. Увеличивается при низких температурах и высоких сопротивлениях источника сигнала.

Наиболее распространенные параметры, используемые для анализа шума усилителя, – это приведенное к входу шумовое напряжение и приведенный к входу шумовой ток. Их описывают как приведенную к входу спектральную плотность шума или среднеквадратический шум в полосе  $\Delta f = 1$  Гц, как правило, в единицах  $\text{пА}\sqrt{\text{Гц}}$  (для шумового тока) или  $\text{нВ}\sqrt{\text{Гц}}$  (для шумового напряжения). Мощность шума пропорциональна ширине полосы, а шумовое напряжение и плотность шумового тока пропорциональны корню из ширины полосы.

Все внутренние шумы ОУ обычно приводятся к входу. Эти шумы обладают следующими свойствами:

- В лучших ОУ спектральная плотность шума может быть ниже  $1 \text{ нВ}\sqrt{\text{Гц}}$ .
- ОУ на биполярных транзисторах имеют шумовое напряжение ниже, чем ОУ на полевых транзисторах, но у них значительно выше шумовой ток.
- Шумовые характеристики ОУ на биполярных транзисторах зависят от тока покоя.

Для выбора ОУ, у которого вклад собственного шума пренебрежимо мал по сравнению с сопротивлением  $R_S$  источника входного сигнала, можно воспользоваться показателем качества операционного усилителя —  $R_{S\text{OP}}$ . Его можно найти, используя шумовые характеристики усилителя, по формуле:

$$R_{S\text{OP}} = e_n / i_n, \quad (3)$$

где  $e_n$  — приведенное к входу шумовое напряжение;  $i_n$  — приведенный к входу шумовой ток.

Вклад шумов ОУ в работу схемы зависит от сопротивления источников следующим образом:

- $R_S \gg R_{S\text{OP}}$  — доминирует приведенный к входу токовый шум;
- $R_S = R_{S\text{OP}}$  — шум усилителя пренебрежимо мал, доминирует шум резистора;
- $R_S \ll R_{S\text{OP}}$  — доминирует приведенный к входу шум напряжения.

Для снижения уровня мешающих сигналов резистивных источников шума используйте следующие правила:

- Ограничивайте полосу частот до минимально необходимого уровня.
- Где только возможно, используйте резисторы минимального номинала.
- Используйте малозумящие резисторы, например, резисторы на основе металлической фольги, проволочные и металлопленочные резисторы.
- Уменьшайте количество резистивных источников шума, где только возможно.

Основным способом снижения шумов и любых других аддитивных погрешностей ОУ является настройка схемы, обеспечивающая максимально возможную величину аналитического сигнала. Например, для ОУ общего применения типовое значение вызываемой смещением нуля помехи составляет около  $1 \text{ мВ}$ . Если выходной сигнал  $U_{\text{вых}}$  ОУ равен  $5 \text{ мВ}$ , то относительная погрешность составляет 20 %. При выходном сигнале  $5 \text{ В}$  она снижается до 0,02 %. При этом необходимо не допустить перехода в режим насыщения транзисторов выходного каскада ОУ. Для этого необходимо выполнить условие:

$$U_{\text{п}}^+ - 1\text{В} > U_{\text{вых}} > U_{\text{п}}^- + 1\text{В}, \quad (4)$$

где:  $U_{\text{п}}^+$  и  $U_{\text{п}}^-$  – положительное и отрицательное напряжения электропитания ОУ.

## 1.2. Разновидности операционных усилителей

В настоящее время изготавливаются сотни наименований интегральных ОУ. Все они могут быть разделены на группы, объединенные общей технологией и

схемотехникой, точностными, динамическими или эксплуатационными характеристиками.

ОУ можно разделить на биполярные, биполярно-полевые и КМОП (на комплементарных полевых транзисторах с изолированным затвором). В биполярно-полевых ОУ полевые транзисторы с управляющим р-п переходом или МОП-транзисторы обычно используются в качестве входных в дифференциальном входном каскаде. За счет этого достигается высокое входное сопротивление и малые входные токи.

Большая часть номенклатуры ОУ относится к **усилителям общего назначения**. Это дешевые усилители среднего быстродействия, невысокой точности и малой выходной мощности. Обычные параметры: коэффициент усиления  $A = 20\,000 - 200\,000$ ; напряжение смещения нуля  $V_{OS} = 0,1 - 20$  мВ; частота единичного усиления  $f_U = 0,1 - 10$  МГц. Типичные примеры: 140УД6, 140УД8, 153УД6, LF411.

**Быстродействующие усилители** при средних точностных параметрах имеют высокие динамические характеристики ( $f_U = 20 - 1000$  МГц,  $S_R = 10 - 1000$  В/мкс). Быстродействие ОУ ограничивает два обстоятельства. Во-первых, в состав входного дифференциального усилителя входят р-п-р-транзисторы, относительно низкочастотные из-за меньшей подвижности дырок по сравнению со свободными электронами. Во-вторых, скорость нарастания ограничена скоростью заряда корректирующего конденсатора  $C_k$ . Влияние первого фактора устраняют, используя во входном каскаде более быстродействующие р-канальные полевые транзисторы. Увеличить скорость заряда  $C_k$  можно либо увеличив ток дифференциального каскада, либо уменьшив емкость  $C_k$ . В первом случае увеличивается ток потребления ОУ, а во втором ухудшается устойчивость. Повысить устойчивость можно, вводя дополнительные фазоопережающие звенья в схему усилителя или вне его. Как следствие, быстродействующие ОУ склонны к неустойчивости. Типичные примеры: 140УД10, 574УД3, 154УД4, ОРА634.

**Прецизионные усилители** имеют высокий дифференциальный коэффициент усиления по напряжению, малое напряжение смещения нуля и малый входной ток обычно при низком или среднем быстродействии. Увеличение  $K_U$  возможно путем усовершенствования каскадов усиления по напряжению или применением трехкаскадной схемы (например, 551УД1), что усложняет частотную коррекцию. Радикально уменьшить смещение нуля позволяет применение модуляции-демодуляции (МДМ), либо периодическая компенсация дрейфа (прерывание). Типичные примеры: 140УД26, МАХ400М, ОРА227 (без прерывания), ICL7652, 140УД24, МАХ430 (с прерыванием).

**Микроомощные усилители** используются в приборах, получающих питание от гальванических или аккумуляторных батарей. Эти усилители потребляют очень малый ток от источников питания (например, ОУ МАХ406 потребляет ток не более 1,2 мкА). Все другие параметры (особенно быстродействие) у них обычно невысокие. Для того, чтобы дать возможность проектировщику найти компромисс между малым потреблением и низким быстродействием некоторые модели микроомощных ОУ выполняются программируемыми. Программируемый ОУ имеет специальный вывод, который через внешний резистор соединяется с общей точкой или источником питания определенной полярности. Сопротивление резистора задает ток системы токовых зеркал усилителя, которые выполняют функции генераторов стабильного тока и динамической нагрузки каскадов усилителя. Уменьшение этого резистора приводит к увеличению быстродействия ОУ и увеличению потребляемого тока. Увеличение - к обратному результату. Типичные примеры: 140УД12, 1407УД2, ОР22. Обычная величина тока потребления для микроомощных и программируемых ОУ - десятки микроампер. Микроомощные ОУ, как правило, допускают питание от весьма низких напряжений. Например, ОУ типа МАХ480 допускает работу от источников с напряжением от +/-0,8 до +/-18 В при токе потребления 15 мкА.

Если источник сигнала - однополярный (например, фотодиод), целесообразно использовать **операционный усилитель с однополярным питанием**. Это позволит

питать усилитель от одной батареи или даже элемента, например, от литиевого элемента напряжением 3 вольта. Основное требование, предъявляемое к ОУ с однополярным питанием, - диапазон входного синфазного сигнала должен простираться ниже отрицательного напряжения питания (обычно привязанного к потенциалу земли), а размах выходного напряжения должен быть ограничен снизу практически напряжением питания (потенциалом земли). Существуют усилители, диапазоны входных и выходных напряжений которых почти достигают и верхней и нижней границы питания (так называемые, rail-to-rail вход и выход), причем входные напряжения могут даже заходить за эти границы. Типичные примеры: MAX495, потребляющий от однополярного источника ток 150 мкА, LMV321, потребляющий ток 145 мкА, от источника 1,8 В.

Многие фирмы выпускают **многоканальные усилители**. Это микросхемы, имеющие на одном кристалле два, три или четыре однотипных ОУ. Например, ИМС типа 140УД20 имеет в своем составе два ОУ 140УД7. Микросхемы MAX406/407/409 и ОРА227/2227/4227 включают, соответственно, один, два и четыре однотипных усилителя.

**Мощные и высоковольтные операционные усилители.** Большинство типов ОУ рассчитаны на напряжение питания +/-15 В. Некоторые допускают питание от источников вплоть до +/-22 В. Этого недостаточно для управления, например, пьезоэлектрическими преобразователями, для некоторых физических и биологических исследований. Поэтому промышленность производит высоковольтные ОУ, допускающие более высокие питающее и выходное напряжения. К высоковольтным относят операционные усилители, имеющие разность положительного и отрицательного питающих напряжений свыше 50 вольт. Проблема повышения напряжений в интегральных полупроводниковых (монокристаллических) ОУ связана с трудностью создания интегральных высоковольтных транзисторов и прочной изоляции между элементами в кристалле. Поэтому большинство ОУ с напряжением питания свыше 100 В изготавливаются в виде гибридных ИМС. В то же время, фирма Apex Microtechnology (США) производит полупроводниковые интегральные ОУ РА90, РА92 и РА94, с номинальным напряжением питания +/-200 В, выходным напряжением +/-170 В и выходным током до 14 А.

### 1.3. Основные схемы включения операционных усилителей

Одним из основных применений ОУ является их использование в качестве усилителей повышенной точности. Различают инвертирующие усилители с отрицательным коэффициентом усиления и неинвертирующие усилители с положительным коэффициентом усиления.

#### Схема инвертирующего усилителя

Схема инвертирующего усилителя показана на рис. 2.

В соответствии с выражением (1) выходное напряжение схемы рис. 2 описывается выражением:

$$U_{\text{вых}} = A \cdot (U_2 - U_1 \pm V_{OS}), \quad (5)$$

где  $V_{OS}$  - напряжение смещения нуля операционного усилителя.

Для идеального ОУ при  $A = \infty$  и  $U_2 = V_{OS} = 0$  при  $U_{\text{вых}} \neq \infty$  получаем  $U_1 = 0$ . Из этого следует, что общий коэффициент усиления  $K$  схемы рис. 2 равен  $R_2 / R_1$ , а работа всей схемы описывается уравнением:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \cdot R_2 / R_1 = U_{\text{вх}} \cdot K. \quad (6)$$

#### Схема неинвертирующего усилителя

Схема неинвертирующего усилителя показана на рис. 3.

В соответствии с выражением (1) выходное напряжение схемы рис. 2 описывается выражением:

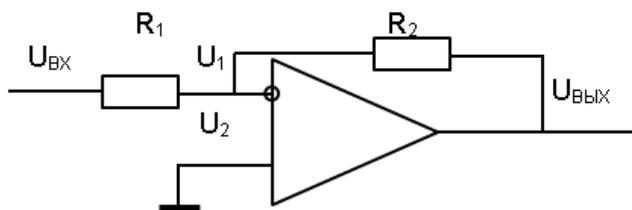


Рис. 2. Схема инвертирующего усилителя

$$U_{\text{ВЫХ}} = A \cdot (U_2 - U_1 \pm V_{OS}) + 10^{\frac{S_R}{20}} (U_2 + U_1) / 2,$$
 где  $S_R$ , ДБ – коэффициент подавления синфазных сигналов.

Для идеального ОУ при  $A = \infty$ ,  $V_{OS} = 0$  и  $S_R = \infty$ , при  $U_{\text{ВЫХ}} \neq \infty$  получаем  $U_1 = U_2 = U_{\text{ВЫХ}} R_1 / (R_1 + R_2)$ .

Из этого следует, что общий коэффициент усиления  $K$  схемы рис. 3 равен  $(R_2 + R_1) / R_1$ , а работа всей схемы описывается уравнением:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot (1 + R_2 / R_1) = U_{\text{ВХ}} \cdot K. \quad (7)$$

## 2. Исследование погрешностей схем на операционных усилителях с помощью моделирования схем программой Multisim

В данной работе предлагается исследовать зависимость погрешности схем инвертирующего и неинвертирующего усилителей от параметров ОУ. Исследование проводится с помощью компьютерной программы Multisim. Общий вид схем инвертирующего и неинвертирующего усилителей приведен на рис. 4. Инвертирующий усилитель собран на виртуальном ОУ U1 и резисторах R1 и R2. Неинвертирующий усилитель состоит из виртуального ОУ U2 и резисторов R3 и R4. Входное напряжение контролируется мультиметром XMM1 и задается источником V3. Для изменения величины входного напряжения необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по изображению источника V3 и во вкладке Value задать требуемую величину входного напряжения (Voltage (V)).

Выходное напряжение инвертирующего усилителя контролируется мультиметром XMM2, а неинвертирующего – мультиметром XMM3.

Для вызова окна параметров ОУ необходимо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши по его изображению. Открывшееся окно изображено на рисунке 5. В нем указаны параметры операционного усилителя. В работе необходимо изучить зависимость выходных напряжений от следующих параметров:

<b>Коэффициент усиления ОУ</b>	Open loop gain (A), V/V	200k
<b>Напряжение смещения нуля</b>	Input offset voltage (VOS), V	1mV
<b>Коэффициент подавления синфазных сигналов</b>	CMRR (in dB)	100

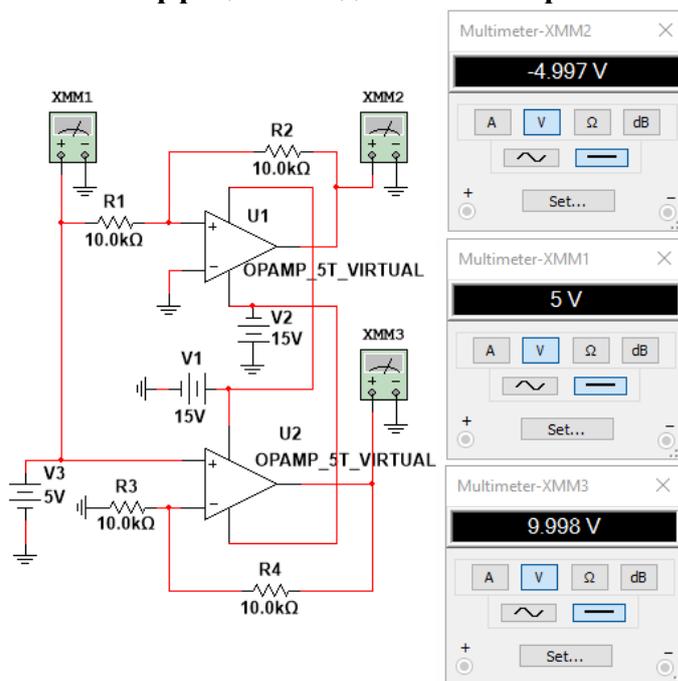


Рис. 4. Схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

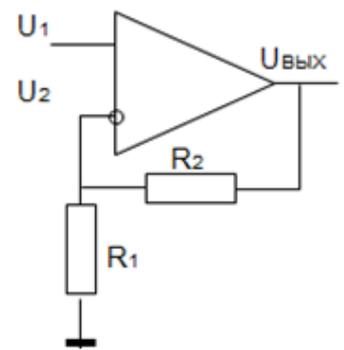


Рис. 3. Схема неинвертирующего усилителя

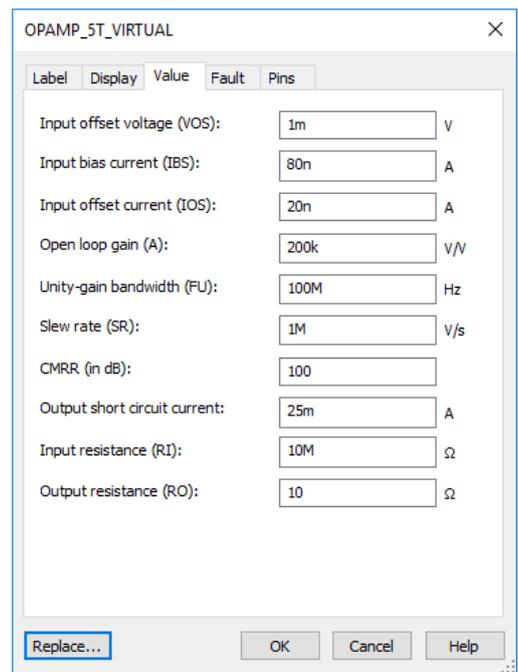


Рис. 5. Параметры операционного усилителя.

Их величины задаются в представленном на рис. 5 окне OPAMP\_5T\_VIRTUAL. При выполнении работы необходимо помнить, что величины этих параметров необходимо задавать для каждого из ОУ U1 и U2.

Для выполнения исследований необходимо:

1. В компьютерной программе Multisim собрать схему рис. 4.
2. Меняя входные напряжения  $U_{ВХ}$  и параметры ОУ в соответствии с данными таблицы 1, замерить и занести в эту таблицу значения выходных сигналов  $U_{ВЫХ}$  для схем инвертирующего и неинвертирующего усилителей.
3. Вычислить и занести в таблицу 1 реальные значения коэффициента усиления  $K_p$ . Он вычисляется как  $K_p = -(U_{ВЫХ5} - U_{ВЫХ0}) / 5 В$ . Здесь  $U_{ВЫХ5}$  – выходное напряжение при  $U_{ВХ}=5 В$ , а  $U_{ВЫХ0}$  – выходное напряжение при  $U_{ВХ}=0 В$ .
4. Вычислить мультипликативную погрешность  $\phi$  коэффициента усиления схемы как  $\phi = 100\% \cdot (K_p - K) / K$ . Результаты вычислений занести в таблицу 1.

Результаты экспериментальных исследований.

Таблица 1.

Схема	Вход. напр. $U_{ВХ}$ , В	Параметры ОУ			$U_{ВЫХ}$ , В	Коэффициент усиления, $K$		Погрешности	
		Коэф. усил. $A$	Смещ. нуля, мВ	Подавл. синфазн. $S_R$ , дБ		Идеальн.	Реальн.	Мультипл., $\phi$ , %	Аддитивн., $\Delta U$ , мВ
Инвертирующий усилитель	0	1	0	100		-1			
	5	1	0	100		-1			
	0	10	0	100		-1			
	5	10	0	100		-1			
	0	100	0	100		-1			
	5	100	0	100		-1			
	0	1k	0	100		-1			
	5	1k	0	100		-1			
	0	10k	0	100		-1			
	5	10k	0	100		-1			
Неинвертирующий усилитель	0	1	0	100		2			
	5	1	0	100		2			
	0	10	0	100		2			
	5	10	0	100		2			
	0	100	0	100		2			
	5	100	0	100		2			
	0	1k	0	100		2			
	5	1k	0	100		2			
	0	10k	0	100		2			
	5	10k	0	100		2			
	0	100k	0	100		2			
	5	100k	0	100		2			

Схема	Вход. напр. $U_{ВХ}$ , В	Параметры ОУ			$U_{ВЫХ}$ , В	Коэффициент усиления, $K$		Погрешности	
		Коэф усил $A$	Смещ нуля, мВ	Подавл. синфазн, $S_R$ , дБ		Идеальн.	Реальн.	Мультипл., $\phi$ , %	Аддитивн., $\Delta U$ , мВ
Инвертирующий усилитель	0	500k	0	100		-1			
	5	500k	0	100		-1			
	0	500k	1	100		-1			
	5	500k	1	100		-1			
	0	500k	10	100		-1			
	5	500k	10	100		-1			
	0	500k	100	100		-1			
	5	500k	100	100		-1			
	0	500k	1000	100		-1			
	5	500k	1000	100		-1			
Неинвертирующий усилитель	0	500k	0	100		2			
	5	500k	0	100		2			
	0	500k	1	100		2			
	5	500k	1	100		2			
	0	500k	10	100		2			
	5	500k	10	100		2			
	0	500k	100	100		2			
	5	500k	100	100		2			
	0	500k	1000	100		2			
	5	500k	1000	100		2			
Инвертирующий усилитель	0	500k	0	100		-1			
	5	500k	0	100		-1			
	0	500k	0	80		-1			
	5	500k	0	80		-1			
	0	500k	0	60		-1			
	5	500k	0	60		-1			
	0	500k	0	40		-1			
	5	500k	0	40		-1			
	0	500k	0	20		-1			
	5	500k	0	20		-1			
Неинвертирующий усилитель	0	500k	0	100		2			
	5	500k	0	100		2			
	0	500k	0	80		2			
	5	500k	0	80		2			
	0	500k	0	60		2			
	5	500k	0	60		2			
	0	500k	0	40		2			
	5	500k	0	40		2			
	0	500k	0	20		2			
	5	500k	0	20		2			
Неинвертирующий усилитель	0	500k	0	10		2			
	5	500k	0	10		2			

5. Вычислить приведенную ко входу аддитивную погрешность  $\Delta U$  схемы усилителя как  $\Delta U = U_{\text{ВЫХО}} / K$ . Результаты вычислений занести в таблицу 1.
6. Построить графики зависимостей погрешности схем инвертирующего и неинвертирующего усилителей от исследуемых параметров.
7. По полученным результатам сделать выводы.

### Содержание отчета

Выполнить изложенные выше задания. Оформить все полученные результаты в виде файла Word (.doc или .docx). Отчет должен содержать:

1. Титульный лист с указанием названия работы, № группы, ФИО.
2. Цель работы.
3. Названия заданий к экспериментальным исследованиям.
4. Схемы исследуемых цепей.
5. Результаты экспериментальных измерений и теоретических расчетов. Временные диаграммы и графики, построенные по результатам измерений и расчетов.
6. Выводы и сопоставление результатов измерений и расчетов.

Образец оформления отчета приведен в ПРИЛОЖЕНИИ 1 описания первой лабораторной работы. Отчет сформировать в виде файла Word (.doc или .docx). К отчету приложить модель исследуемых схем в виде файла Multicim (.ms13 или .ms14). Эти два файла необходимо передать преподавателю, прикрепляя их на странице задания по кнопке «Загрузить файл».