

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
И УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Кафедра информатики и управления в технических системах

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы по дисциплине
"Технические средства и элементная база
робототехнических систем "
для студентов направления подготовки
27.03.04 – Управление в технических системах



Севастополь
СевГУ
2019

УДК 621.375 (076)
ББК 32.971я73
И88

Р е ц е н з е н т:

В.А. Карапетьян – доцент кафедры "Информатика и управление в технических системах", кандидат техн. наук, доцент

Составитель: А.Е. Осадченко

И88 **Исследование операционного усилителя:** метод. указания к выполнению лабораторной работы по дисциплине "Технические средства и элементная база робототехнических систем" для студентов направления подготовки 27.03.04 – Управление в технических системах / Сост. А.Е. Осадченко. – Севастополь: СевГУ, 2019. – 23 с.

В методических указаниях приводится описание лабораторной работы, целью которой является исследование характеристик операционного усилителя с применением лабораторных стендов «Основы электроники-2».

Методические указания предназначены для студентов направления подготовки 27.03.04 Интеллектуальные робототехнические системы.

УДК 621.375 (076)
ББК 32.971я73

Методические указания рассмотрены и утверждены на заседании кафедры "Информатика и управления в технических системах", протокол № 6 от 14 февраля 2019 г.

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию на заседании ученого совета Института информационных технологий и управления в технических системах, протокол № 5 от 25 апреля 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	3
1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ	4
2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ.....	4
2.1. ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ.....	4
2.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ.....	5
2.3. ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ	5
2.4. ПАРАМЕТРЫ РЕАЛЬНЫХ ОУ	7
2.5. АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОУ	8
2.6. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОУ	9
2.7. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОУ	11
3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	11
4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	12
4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ	12
4.2. ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ	14
4.3. ИССЛЕДОВАНИЕ АЧХ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ	16
5. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	20
6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	21
7. ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ РАБОТЫ.....	21
8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ	22
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	22
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	23

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование характеристик операционных усилителей с отрицательной обратной связью.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Операционный усилитель

Операционный усилитель (ОУ; англ. operational amplifier, OpAmp) — усилитель постоянного тока с дифференциальным входом, имеющий высокий коэффициент усиления [1, с. 118]. В настоящее время ОУ широко применяются в виде отдельных чипов и функциональных блоков в составе более сложных интегральных схем. На основе ОУ можно построить различные электронные узлы, характеристики которых определяются в основном цепями обратной связи. Такая особенность ОУ существенно упрощает проектирование электронных схем. Обозначение ОУ на схемах показано на рис. 1.

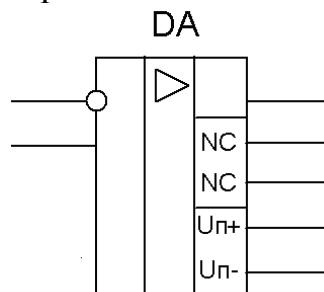


Рис. 1. Обозначение ОУ на схемах

На рис.1 с левой стороны инвертирующий (сверху) и неинвертирующий входы. С правой стороны - выход (сверху), выводы коррекции (NC), выводы питания ($U_{п+}$, $U_{п-}$). Часто на схемах можно встретить другие обозначения, показанные на рис 2.

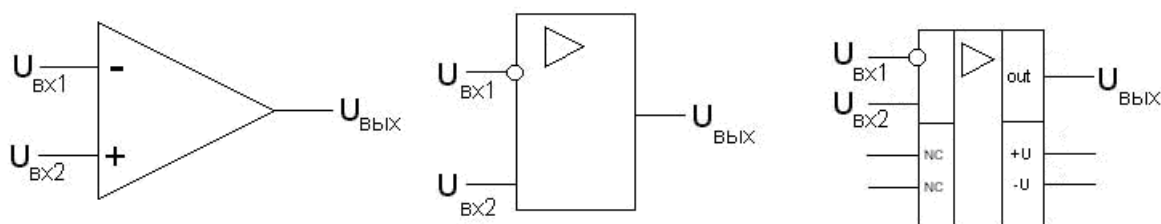


Рис. 2. Различные способы обозначения ОУ на схемах

Операционный усилитель изначально был спроектирован для выполнения математических операций (отсюда его название), путём использования напряжения как аналоговой величины. Такой подход лежит в основе аналоговых компьютеров, в которых ОУ использовались для моделирования базовых математических операций (сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т. д.).

Первый интегральный ОУ был спроектирован инженером фирмы «Fairchild Semiconductor» Робертом Видларом в 1963 году, для военных применений. В 1968 году фирма «Fairchild Semiconductor» выпустила недорогой ОУ $\mu A741$ со встроенной частотной коррекцией. Многие производители до сих пор выпускают вер-

сии этого чипа. Позднее были разработаны ОУ на полевых транзисторах с P-N переходом и с изолированным затвором, что улучшило их характеристики.

Операционный усилитель считается наиболее часто встречающимся элементом в аналоговой схемотехнике. Добавление нескольких внешних компонентов к ОУ позволяет построить различные схемы обработки аналоговых сигналов [2, с. 72].

2.2. Основные параметры операционного усилителя

Эквивалентная схема ОУ в которой смоделированы некоторые параметры представлена на рис.3

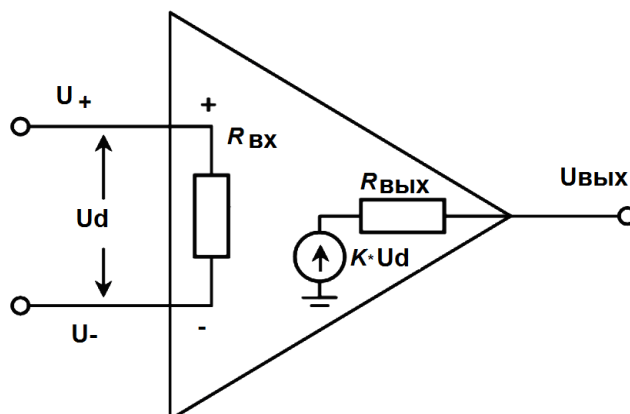


Рис. 3. Эквивалентная схема ОУ

Идеальный операционный усилитель имеет следующие свойства:

- коэффициент усиления $K = \infty$;
- входное сопротивление $R_{ВХ} = \infty$ (ток от U_+ к U_- не течёт);
- выходное сопротивление $R_{ВЫХ} = 0$ (выходное напряжение $U_{ВЫХ}$ не изменяется при изменении выходного тока);
- диапазон выходных напряжений $U_{ВЫХ}$ равен бесконечности;
- нулевой входной ток (нет токов утечки и токов смещения);
- нулевое напряжение смещения (когда $U_+ = U_-$, то на выходе $U_{ВЫХ} = 0$);
- $U_{ВЫХ}$ зависит только от $U_d = U_+ - U_-$ (подавление синфазного сигнала);
- параметры ОУ не зависят от изменения напряжений источников питания;
- бесконечно широкая полоса пропускания (амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики является идеально плоскими с нулевым фазовым сдвигом);
- скорость изменения выходного напряжения не ограничена (напряжение и ток не ограничены на всех частотах).

2.3. Обратные связи в усилителях

Обратной связью называют процесс передачи сигнала из выходной цепи во входную. Цепь, обеспечивающую эту передачу, называют цепью обратной связи. Петля, или контур обратной связи, состоит из прямого пути, образуемого активным элементом, и обратного пути, образуемого цепью обратной связи [1, с. 119].

На рис. 4 представлена схема ОУ с цепью обратной связи в виде делителя напряжения.

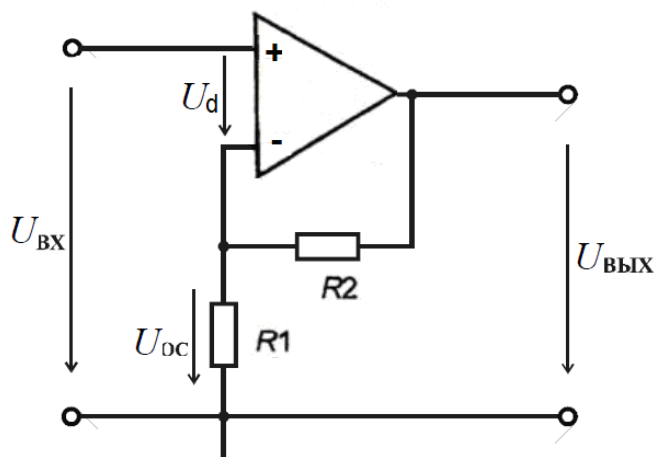


Рис. 4. Схема усилителя с цепью обратной связи

Если принять, что выходное сопротивление $R_{OUT} = 0$, входное сопротивление $R_{IN} = \infty$, $U_{ВЫХ} = KU_d$, то напряжение обратной связи $U_{ОС} = U_{ВЫХ} \frac{R1}{R1 + R2} = \beta U_{ВЫХ}$, где β - коэффициент передачи цепи обратной связи.

$$\beta = \frac{R1}{R1 + R2} \quad (1)$$

Напряжение на входе усилителя

$$U_d = U_{ВХ} - U_{ОС}. \quad (2)$$

Так как напряжение обратной связи вычитается из входного, то такая связь является отрицательной.

Принимая $U_{ВЫХ} = KU_d$, где K - коэффициент усиления ОУ из (2) получаем

$$U_d = U_{ВХ} - U_{ВЫХ} \beta = U_{ВХ} - U_d K \beta, \quad (3)$$

$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ} \frac{K}{1 + K \beta}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что коэффициент усиления ОУ с отрицательной обратной связью (рис. 3) равен

$$K_{ОС} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{K}{1 + K \beta}. \quad (5)$$

Знаменатель в формуле (5) показывает глубину обратной связи, а произведение $K\beta$ называют коэффициентом петлевого усиления. Если $K\beta \gg 1$, то такая обратная связь называется глубокой. В этом случае $U_d \approx 0$, а

$$K_{oc} \approx \frac{1}{\beta} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что в случае глубокой отрицательной обратной связи коэффициент усиления определяется цепью обратной связи и практически не зависит от параметров самого усилителя [2, с. 71].

На рис. 5 представлена схема усилителя с отрицательной обратной связью, в которой входной сигнал подается на инвертирующий вход ОУ, а неинвертирующий вход присоединен к общему проводу. Для случая глубокой отрицательной обратной связи $U_d \approx 0$, следовательно напряжение в точке А будет $U_A \approx 0$.

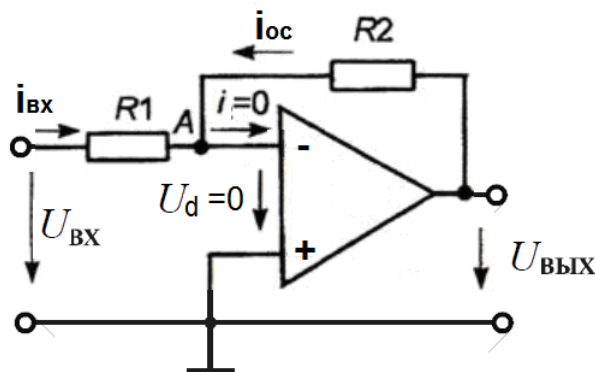


Рис. 5. Инвертирующий ОУ с отрицательной обратной связью

Принимая входной ток ОУ равным нулю, по закону Кирхгофа $i_{BX} = -i_{oc}$ следовательно

$$U_{BX} / R_1 = -U_{VYX} / R_2 \text{ и} \quad (7)$$

Знак минус в формуле (7) показывает, что схема на рис. 5 является инвертирующим усилителем напряжения с коэффициентом

$$K_{oc} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (8)$$

2.4. Параметры реальных ОУ

Современные ОУ выпускаемые ведущими производителями могут иметь параметры, которые в некоторых случаях могут считаться близкими к идеальным.

Например, коэффициент усиления без обратной связи, у некоторых типов ОУ достигает 10^5 для медленноменяющихся входных сигналов, что позволяет создавать усилители с глубокой ОС [2, с 70].

Входное сопротивление ОУ с входными КМОП транзисторами очень велико (более 10^{12} Ом), что практически исключает прохождение входного тока [2, с. 68].

Другие параметры ОУ достаточно далеки от идеальных:

- выходное сопротивление R_{VYX} может находиться в пределах 10-1000 Ом;
- диапазон выходных напряжений U_{VYX} определяется величиной напряжения источников питания (обычно $U_{VYX} < U_{пит}$ на 2-3 В);

- входное напряжение смещения может быть в пределах $10^{-3} \div 10^{-6}$ В (при котором $U_{\text{ВЫХ}} = 0$);
- $U_{\text{ВЫХ}}$ зависит не только от $U_d = U_+ - U_-$, но и от величин U_+ и U_- (подавление синфазного сигнала может достигать 80-90 дБ);
- параметры ОУ зависят от изменения напряжений источников питания;
- полоса пропускания у большинства ОУ без ООС достаточно узкая $f_{\text{ср}} < 100$ Гц (АЧХ имеет спадающий характер в области высокой частоты, начиная от частоты среза $f_{\text{ср}}$);
- с ростом частоты входного сигнала увеличивается фазовый сдвиг выходного сигнала;
- скорость изменения выходного напряжения для различных типов ОУ может находиться в пределах 10-1000 В/мкс.

2.5. Амплитудные характеристики ОУ

Ограниченность $U_{\text{ВЫХ}}$ приводит к тому, амплитудные (передаточные) характеристики ОУ нелинейные. Их представляют в виде двух кривых, относящихся соответственно к инвертирующему и неинвертирующему входам. Характеристики снимают при подаче сигнала на один из входов, при нулевом сигнале на другом. Каждая из кривых состоит из наклонного (линейного) участка с пропорциональной зависимостью выходного напряжения от входного и горизонтального участка которому соответствуют режиму полностью открытого (насыщенного) либо закрытого транзисторов выходного каскада [1, с 69]. Пример амплитудной характеристики ОУ приведен на рис. 6.

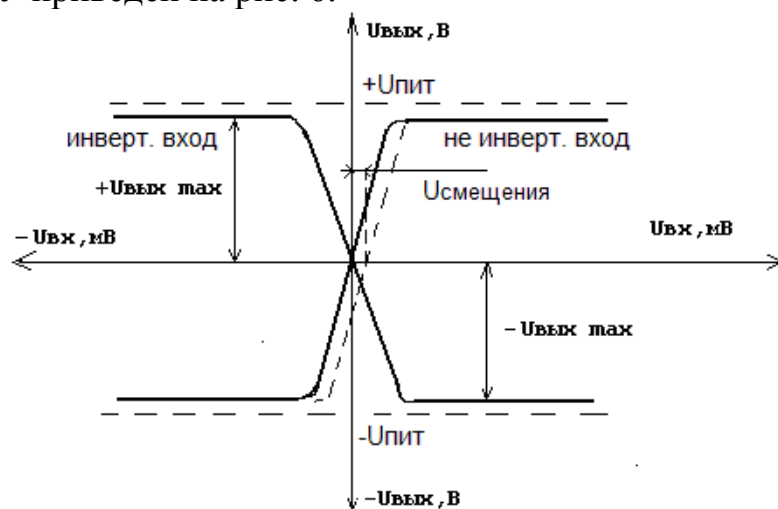


Рис. 6. Амплитудная характеристика ОУ

Угол наклона участка линейного участка определяется коэффициентом усиления $K = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}$, величина напряжения горизонтального участка определяется соответствующими величинами напряжений источников питания $+U_{\text{пит}}$ и $-U_{\text{пит}}$.

Амплитудные характеристики могут не проходить через 0 (пунктирная линия на рис. 6), что объясняется разбалансом реальных ОУ на величину $U_{\text{смещения}}$. На рис. 7 показана передаточная характеристика ОУ для синфазного сигнала.

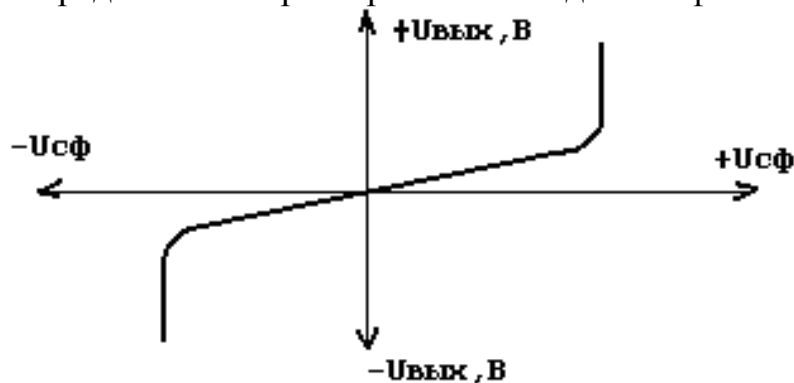


Рис. 7. Передаточная характеристика ОУ для синфазного сигнала

В реальных ОУ при подаче одинакового напряжения на инвертирующий и неинвертирующий входы, выходное напряжение не равно нулю и зависит от величины входного. Существует диапазон синфазных входных напряжений, в котором выходное напряжение слабо зависит от их величин (область ослабления синфазного сигнала). ОУ характеризуется коэффициентом ослабления синфазного сигнала.

При величинах синфазных напряжений сравнимых с напряжениями источников питания ОУ, коэффициент передачи синфазного сигнала резко возрастает.

2.6. Частотные характеристики ОУ

На рис. 8 представлена АЧХ ОУ, которая имеет спадающий характер в области высоких частот. Причиной этого является частотная зависимость параметров транзисторов и паразитных емкостей схемы ОУ. Граничной частоте f_{gr} , соответствует снижение коэффициента усиления ОУ в корень квадратный из 2 раз.

Частота f_1 , при которой коэффициент усиления ОУ равен единице, называется частотой единичного усиления.

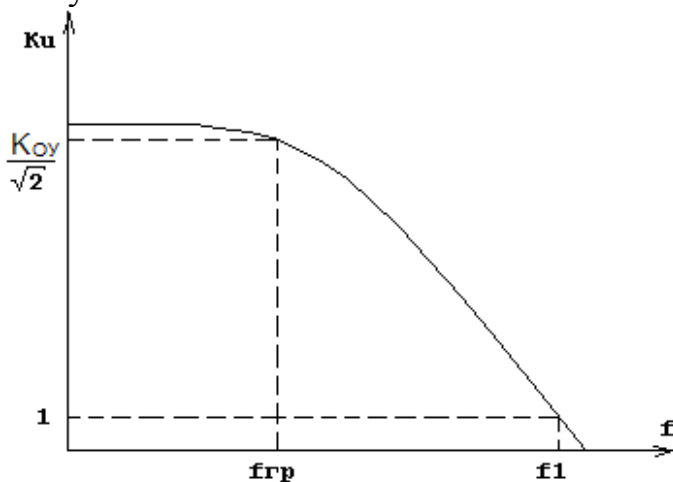


Рис. 8. АЧХ ОУ

На рис. 9 представлена ФЧХ ОУ, из которой видно, что с ростом частоты входного сигнала увеличивается фазовый сдвиг выходного сигнала, достигая на высоких частотах 180 град. и более.

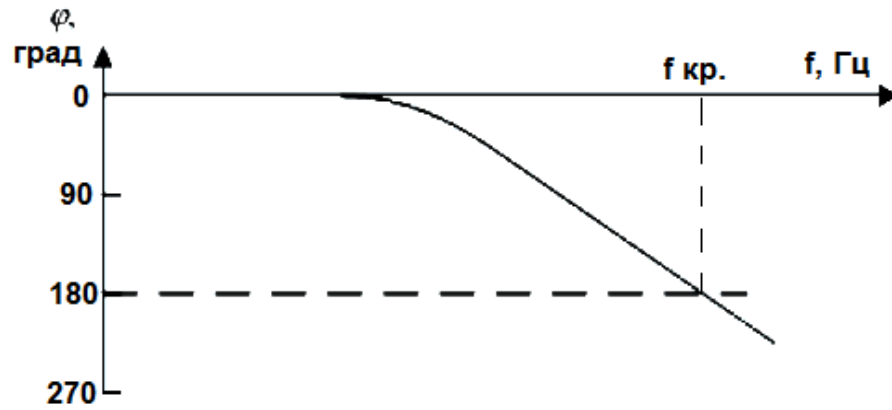


Рис. 9. ФЧХ ОУ

При использовании ОУ с ООС сигнал с выхода подается на его инвертирующий вход, что соответствует сдвигу фаз на 180 град. Таким образом на некоторой критической частоте общий фазовый сдвиг достигает 360 град. и ООС превращается в положительную обратную связь. При этом устойчивость ОУ определяется условием

$$K_{\text{фкр}} \beta < 1. \quad (9)$$

Из условия (9) следует, что на глубину обратной связи β накладываются ограничения. Универсальные ОУ изготавливаются с встроенными цепями частотной коррекции, которые снижают усиление на высоких частотах, обеспечивая устойчивость работы при любой глубине ООС.

Для удобства анализа АЧХ их выполняют обычно в логарифмическом масштабе, как показано на рис. 10.

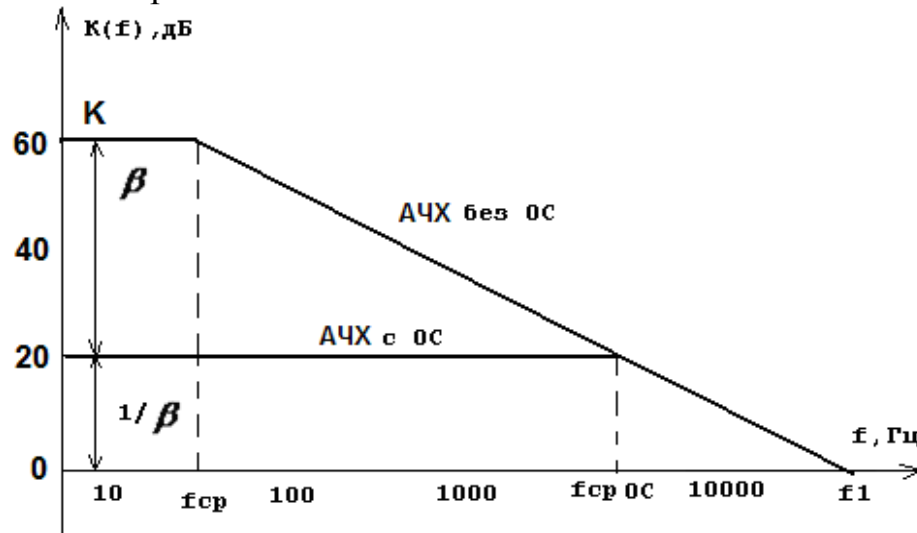


Рис. 10. Логарифмические АЧХ ОУ

Коэффициент усиления по напряжению на логарифмических характеристиках выражают в децибелах: $K_{\text{дБ}} = 20 \lg K$, где K - числовое значение коэффициента усиления по напряжению. Это удобно, так как значения коэффициентов усиления каскадов, выраженные в децибелах, можно складывать графически, вместо того чтобы их перемножать.

Встроенная коррекция универсальных ОУ вызывает спад коэффициента усиления на 20 дБ при увеличении частоты в 10 раз, после $f_{\text{гр}}$.

Рис. 10 иллюстрирует влияние ООС на АЧХ ОУ. Отрицательная ОС ограничивает коэффициент усиления ОУ и значительно расширяет полосу пропускания. Граничная частота $f_{гр.}$ увеличивается за счет уменьшения коэффициента усиления.

Глубина ООС, как видно из рис. 10, есть разность между коэффициентами усиления ОУ без ОС и с ОС, выраженными в децибелах.

Максимальный коэффициент усиления ОУ на заданной частоте приближенно равен отношению f_1 к этой частоте.

2.7. Динамические характеристики ОУ

Динамическими параметрами ОУ являются скорость нарастания выходного напряжения (скорость отклика) и время установления выходного напряжения.

На рис. 11 показана реакция ОУ на воздействие скачка входного напряжения.

Скорость нарастания выходного напряжения находят по отношению приращения выходного напряжения к времени на участке изменения выходного напряжения от $0,1U_{вых}$ до $0,9U_{вых}$. Время установления выходного напряжения $t_{уст}$ оценивают интервалом времени, в течение которого выходное напряжение меняется от уровня 0,1 до уровня 0,9 установившегося значения. Для универсальных ОУ с встроенными цепями частотной коррекции скорость нарастания выходного напряжения обычно невелика - 0,1 - 5 В/мкс.

В быстродействующих ОУ с внешними цепями частотной коррекции скорость выходного сигнала может превышать 1000 В/мкс.

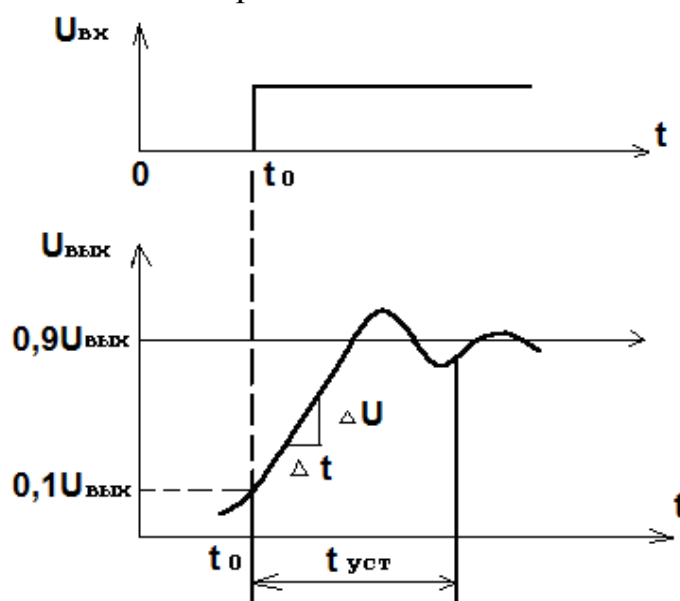


Рис. 11. Реакция ОУ на воздействие скачка

3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Модуль **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**, модуль **МУЛЬТИМЕТРЫ**, модуль **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** на стендах **ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ - 2**.

2. Двухканальный цифровой осциллограф.

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1. Исследование амплитудных характеристик инвертирующего усилителя

Снятие амплитудной характеристики инвертирующего усилителя с обратной связью производится по схеме, показанной на рис.11.

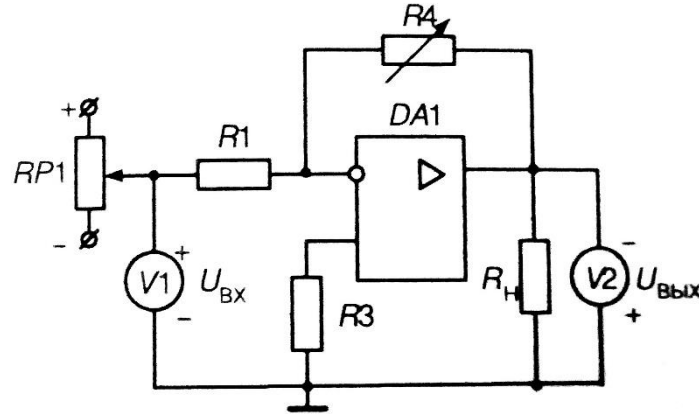


Рис. 11. Схема инвертирующего усилителя

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2. В модуле **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 12).

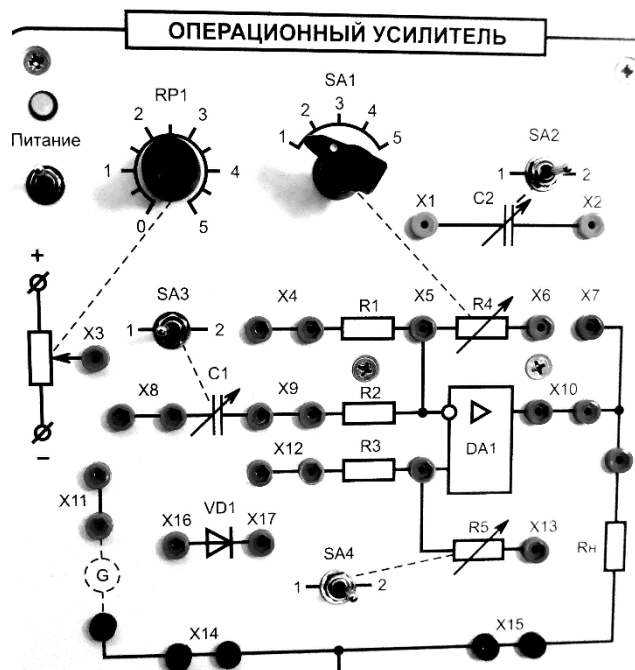


Рис. 12. Вид модуля **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**

3. Установить переключатель **ПИТАНИЕ** в положение **Выкл.**

4. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения мультиметров в положение измерения напряжения в диапазоне 20 В (рис. 13).

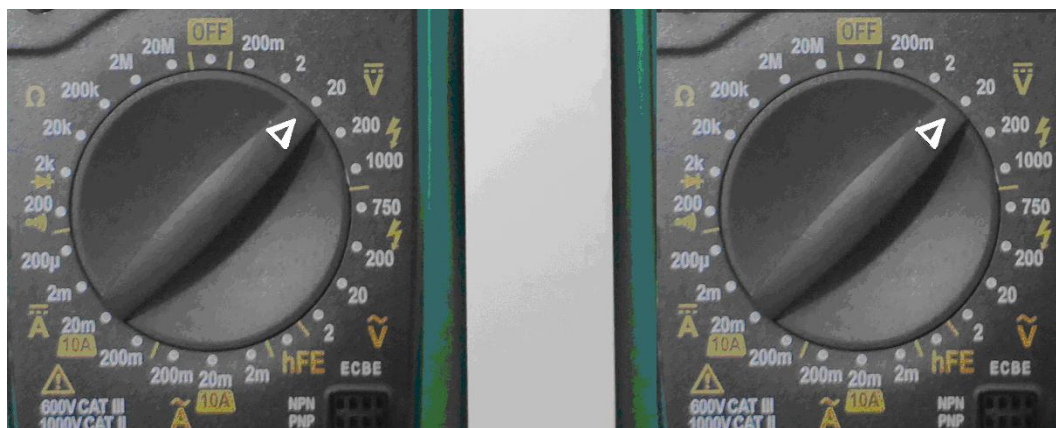


Рис. 13. Вид модуля **МУЛЬТИМЕТРЫ** перед началом работы

5. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X14**.
6. Красный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X4**.
7. Красный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X10**.
8. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X15**.
9. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X10** и **X6**.
10. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X12** и **X14**.
11. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X3** и **X4**.
12. Установить переключатель SA1 в положение 1 ($R4=20\text{кОм}$).
13. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**. Включить питание модуля **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**.
14. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -8 В. Занести в таблицу 1 величину напряжение $U_{\text{вых}}$ согласно показаниям правого мультиметра.
15. Заполнить таблицу 1, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 1- Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R4=20\text{кОм}$)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{вых}}, \text{В}$																	
К																	

16. Установить переключатель SA1 в положение 2 ($R4=50\text{кОм}$).
17. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -8 В. Занести в таблицу 1 величину напряжение $U_{\text{вых}}$ согласно показаниям правого мультиметра.
18. Заполнить таблицу 2, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 2- Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R4=50\text{кОм}$)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{вых}}, \text{В}$																	
К																	

19. Установить переключатель SA1 в положение 3 ($R4=100\text{кОм}$).
20. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -3 В. Занести в таблицу 3 величину напряжение $U_{\text{вых}}$ согласно показаниям правого мультиметра.

21. Заполнить таблицу 1, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 3- Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R_4=100\text{кОм}$)

U _{вх} , В	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
U _{вых} , В													
К													

22. Установить переключатель SA1 в положение 4 ($R_4=150\text{кОм}$).

23. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -2,5 В. Занести в таблицу 1 величину напряжения U_{вых} согласно показаниям правого мультиметра.

24. Заполнить таблицу 4, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 4 - Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R_4=150\text{кОм}$)

U _{вх} , В	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	1	2	2,5
U _{вых} , В												
К												

25. Установить переключатель SA1 в положение 5 ($R_4=200\text{кОм}$).

26. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -1,25 В. Занести в таблицу 5 величину напряжения U_{вых} согласно показаниям правого мультиметра.

27. Заполнить таблицу 5, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 5- Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R_4=200\text{кОм}$)

U _{вх} , В	-1,25	-1	-0,75	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25
U _{вых} , В											
К											

4.2. Исследование амплитудных характеристик неинвертирующего усилителя

Снятие амплитудной характеристики неинвертирующего усилителя с обратной связью производится по схеме, показанной на рис.14.

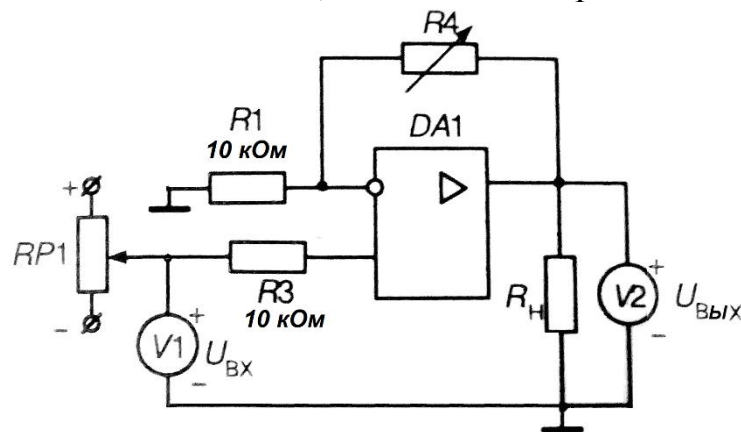


Рис. 14. Схема неинвертирующего усилителя

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2. В модуле **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 12).

3. Установить переключатель **ПИТАНИЕ** в положение **Выкл.**

4. На модуле **МУЛЬТИМЕТРЫ** установить переключатели режима измерения мультиметров в положение измерения напряжения в диапазоне 20 В (рис. 13).

5. Черный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X14**.

6. Красный щуп левого мультиметра вставить в гнездо разъема **X12**.

7. Красный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X10**.

8. Черный щуп правого мультиметра вставить в гнездо разъема **X15**.

9. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X10** и **X6**.

10. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X4** и **X14**.

11. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X3** и **X12**.

12. Установить переключатель SA1 в положение 1 ($R4=20\text{кОм}$).

13. Модуль питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**. Включить питание модуля **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ**.

14. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -7 В. Занести в таблицу 1 величину напряжение $U_{\text{вх}}$ согласно показаниям правого мультиметра.

15. Заполнить таблицу 6, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 6 - Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R4=20\text{кОм}$)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
$U_{\text{вых}}, \text{В}$															
К															

16. Установить переключатель SA1 в положение 2 ($R4=50\text{кОм}$).

17. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -7 В. Занести в таблицу 1 величину напряжение $U_{\text{вх}}$ согласно показаниям правого мультиметра.

18. Заполнить таблицу 7, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 7 - Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R4=50\text{кОм}$)

$U_{\text{вх}}, \text{В}$	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
$U_{\text{вых}}, \text{В}$															
К															

19. Установить переключатель SA1 в положение 3 ($R4=100\text{кОм}$).

20. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -7 В. Занести в таблицу 3 величину напряжение $U_{\text{вх}}$ согласно показаниям правого мультиметра.

21. Заполнить таблицу 8, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 8 - Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=100\text{кОм}$)

$U_{ВХ}, \text{В}$	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
$U_{ВЫХ}, \text{В}$													
К													

22. Установить переключатель SA1 в положение 4 ($R_4=150\text{кОм}$).

23. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -7 В. Занести в таблицу 1 величину напряжения $U_{ВЫХ}$ согласно показаниям правого мультиметра.

24. Заполнить таблицу 9, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 9 - Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=150\text{кОм}$)

$U_{ВХ}, \text{В}$	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	1	2	2,5
$U_{ВЫХ}, \text{В}$												
К												

25. Установить переключатель SA1 в положение 5 ($R_4=200\text{кОм}$).

26. Поворачивая ручку потенциометра RP1, и наблюдая показания левого мультиметра, установить величину входного напряжения равной -7 В. Занести в таблицу 5 величину напряжения $U_{ВЫХ}$ согласно показаниям правого мультиметра.

27. Заполнить таблицу 10, изменяя величину напряжения на входе инвертирующего усилителя.

Таблица 10 - Напряжение на выходе инвертирующего ОУ ($R_4=200\text{кОм}$)

$U_{ВХ}, \text{В}$	-1,25	-1	-0,75	-0,5	-0,25	0	0,25	0,5	0,75	1	1,25
$U_{ВЫХ}, \text{В}$											
К											

4.3. Исследование АЧХ операционного усилителя

Снятие АЧХ неинвертирующего усилителя с обратной связью производится по схеме, показанной на рис.15.

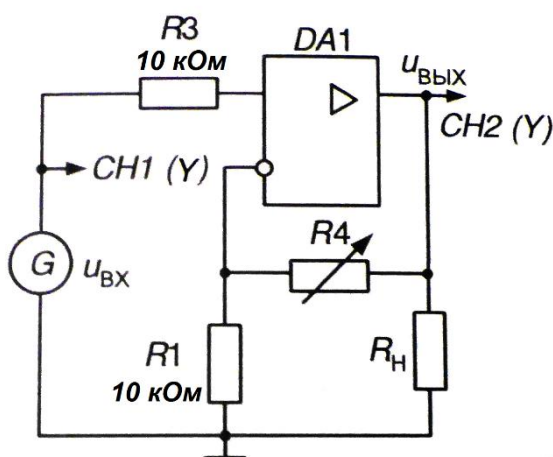


Рис. 15. Схема исследования АЧХ неинвертирующего усилителя

Для выполнения работы необходимо осуществить следующие действия:

1. Выключатель модуля питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВЫКЛЮЧЕНО**.

2. В модуле **ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ** извлечь из гнезд все перемычки (рис. 12).

3. Установить переключатель **ПИТАНИЕ** в положение **Выкл.**
4. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X10** и **X6**.
5. Соединить перемычкой гнезда разъемов **X4** и **X14**.
6. Соединить перемычкой гнездо разъема **X12** и гнездо разъема **Выход** в модуле **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** (рис. 16).
7. Соединить перемычкой гнездо разъема **X14** и гнездо разъема $\perp$ в модуле **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.
8. Установить переключатель SA1 в положение 1 ($R4=20\text{кОм}$).
9. В модуле **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** в секции **Частота** установить переключатель **множитель $\times 1$** , регулятор **f, Гц** в положение **100** (рис. 16).
10. В модуле **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** в секции **Форма** установить переключатель в положение **$\sim 10\text{ В}$** (рис. 16).

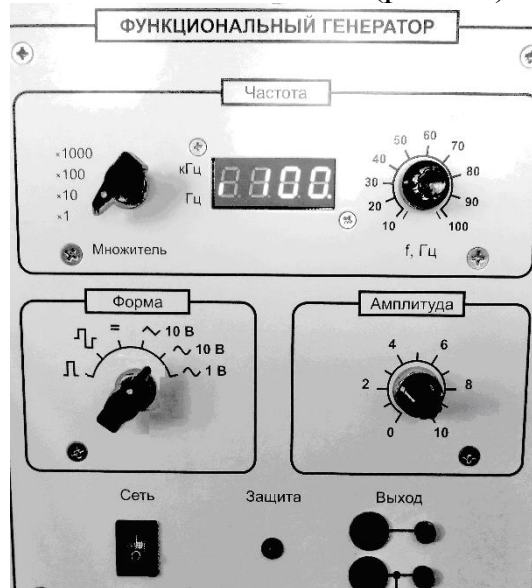


Рис. 16. Вид модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**

10. Красный щуп 1 канала осциллографа подключить к гнезду разъема **X12**.
11. Черный щуп 1 канала осциллографа подключить к гнезду разъема **X15**.
12. Красный щуп 2 канала осциллографа подключить к гнезду разъема **X10**.
13. Черный щуп 2 канала осциллографа подключить к гнезду разъема **X15**.
14. Выключатель модуля питания стенда (220 В) **QF1** установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.
15. Выключатель модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР** (**Сеть**) установить в положение **ВКЛЮЧЕНО**.
16. Включить осциллограф.
17. На передней панели осциллографа нажать кнопку **ИЗМЕР** (рис.17).
Должны быть подсвечены кнопки на передней панели **КАН1**, **КАН2**, **ИЗМЕР** (если нет нажать соответствующую кнопку).
18. На передней панели осциллографа нажать кнопку **МЕНЮ ВКЛ/ВЫКЛ** (рис.17). Должны быть подсвечены кнопки на передней панели **КАН1**, **КАН2**, **ИЗМЕР** (если нет нажать соответствующую кнопку).



Рис. 17. Вид передней панели осциллографа

19. На передней панели осциллографа нажать кнопку **МЕНЮ ВКЛ/ВЫКЛ** (рис.17). Вид экранного меню показан на рис. 18.

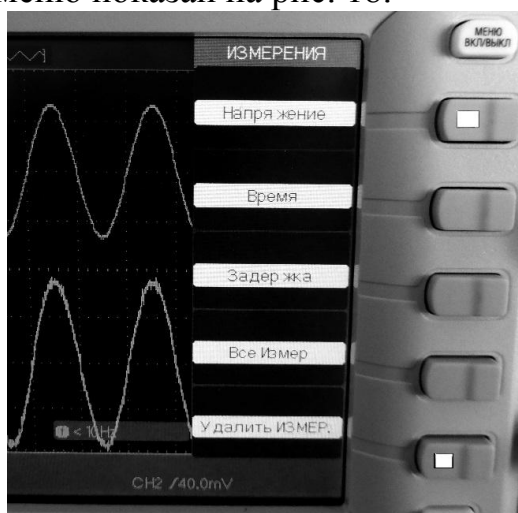


Рис. 18. Вид экранного меню осциллографа

20. Нажать кнопку экранного меню **Удалить ИЗМЕР.**

21. Нажать кнопку экранного меню **Напряжение**. Вид экранного меню **Напряжение** показан на рис. 19.

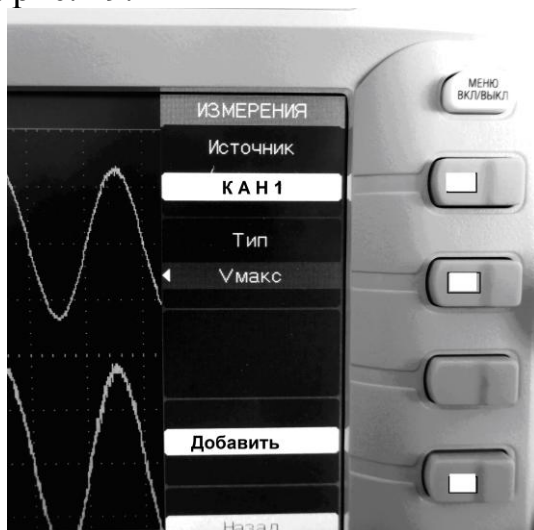


Рис. 19. Вид экранного меню **Напряжение**

22. Нажимая кнопку экранного меню **Источник**, выбрать **КАН1**
23. Нажимая кнопку экранного меню **Тип**, выбрать **Vмакс**.
24. Нажать кнопку экранного меню **Добавить**.
25. Нажимая кнопку экранного меню **Источник**, выбрать **КАН2**
26. Нажимая кнопку экранного меню **Тип**, выбрать **Vмакс**.
27. Нажать кнопку экранного меню **Добавить**.

Результаты измерения напряжений **Vмакс** должны отображаться в левом нижнем углу экрана (рис. 20). Значение напряжения **Vмакс** для 1 канала отображается желтым цветом, для 2 канала - синим.

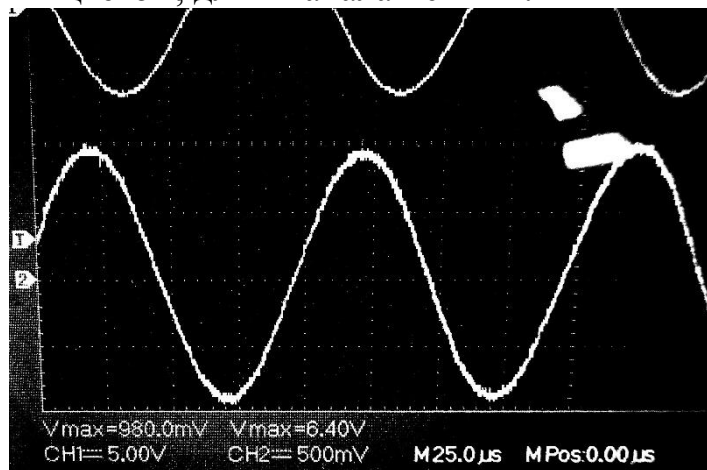


Рис. 20. Результаты измерения напряжений **Vмакс**

28. Поворачивая ручку секции **Амплитуда** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**, и наблюдая показания **Vмакс** для 1 канала, установить величину входного напряжения в пределах 400-600 мВ.

29. Нажать кнопку **АВТО** (на правой стороне передней панели осциллографа, синего цвета) и подождать 5 секунд.

30. Поворачивая ручку секции **Амплитуда** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**, и наблюдая показания **Vмакс** для 1 канала, установить величину входного напряжения в пределах 480-520 мВ.

Занести в таблицу 1 величину напряжение $U_{вых}$ в соответствии с показаниями на экране **Vмакс** для 2 канала входа осциллографа, при частоте входного напряжения 100 Гц.

31. Заполнить таблицу 11, изменяя частоту напряжения на входе инвертирующего усилителя при помощи переключателя **множитель** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Таблица 11- Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=20\text{кОм}$)

f, Гц	100	1000	10000	100000
$U_{вых}$, В				
K				

32. Установить переключатель SA1 в положение 2 ($R_4=50\text{кОм}$).

33. Нажать кнопку **АВТО** и подождать 5 секунд.

34. Заполнить таблицу 12, изменяя частоту напряжения на входе инвертирующего усилителя при помощи переключателя **множитель** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Таблица 12 - Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=50\text{кОм}$)

f, Гц	100	1000	10000	100000
U _{вых} , В				
K				

35. Установить переключатель SA1 в положение 3 ($R_4=100\text{кОм}$).

36. Нажать кнопку **АВТО** и подождать 5 секунд.

37. Заполнить таблицу 13, изменяя частоту напряжения на входе инвертирующего усилителя при помощи переключателя **множитель** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Таблица 13 - Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=100\text{кОм}$)

f, Гц	100	1000	10000	100000
U _{вых} , В				
K				

38. Установить переключатель SA1 в положение 4 ($R_4=150\text{кОм}$).

39. Нажать кнопку **АВТО** и подождать 5 секунд.

40. Заполнить таблицу 14, изменяя частоту напряжения на входе инвертирующего усилителя при помощи переключателя **множитель** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Таблица 14 - Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=150\text{кОм}$)

f, Гц	100	1000	10000	100000
U _{вых} , В				
K				

41. Установить переключатель SA1 в положение 5 ($R_4=200\text{кОм}$).

42. Заполнить таблицу 15, изменяя частоту напряжения на входе инвертирующего усилителя при помощи переключателя **множитель** модуля **ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР**.

Таблица 15- Напряжение на выходе неинвертирующего ОУ ($R_4=200\text{кОм}$)

f, Гц	100	1000	10000	100000
U _{вых} , В				
K				

5. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

1. Используя данные таблиц 1, 2, 3, 4, 5 построить амплитудные характеристики инвертирующего усилителя.

2. Используя амплитудные характеристики, рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для различных величин R_4 .

3. Сравнить полученные коэффициенты усиления по напряжению для различных величин R_4 с теоретическими.

4. Сделать выводы.

5. Используя данные таблиц 6, 7, 8, 9, 10 построить амплитудные характеристики неинвертирующего усилителя.

6. Используя амплитудные характеристики, рассчитать коэффициенты усиления по напряжению для различных величин R_4 .

7. Сравнить полученные коэффициенты усиления по напряжению для различных величин R_4 с теоретическими.

8. Сделать выводы.

9. Используя данные таблиц 11, 12, 13, 14, 15, рассчитать коэффициенты усиления по напряжению неинвертирующего усилителя для различных частот входного сигнала.

10. Используя данные таблиц 11, 12, 13, 14, 15 построить логарифмические АЧХ характеристики неинвертирующего усилителя.

11. Сделать выводы.

12. Используя логарифмические АЧХ характеристики неинвертирующего усилителя рассчитать частоту единичного усиления.

13. Используя логарифмические АЧХ характеристики неинвертирующего усилителя рассчитать коэффициент усиления ОУ без ООС для своего варианта $f_{вх}$ (Приложение А).

14. Рассчитать коэффициент усиления неинвертирующего ОУ для своего варианта R_1 , R_4 (Приложение А).

15. Рассчитать коэффициент усиления инвертирующего ОУ для своего варианта R_1 , R_4 (Приложение А).

16. Построить логарифмическую АЧХ неинвертирующего ОУ для своего варианта R_1 , R_4 (Приложение А).

17. Рассчитать величину R_4 для своего варианта K_{oc} (Приложение А, $R_1=10$ кОм). Нарисовать схему усилителя.

18. Рассчитать величину $U_{вых}$ инвертирующего ОУ для своего варианта $U_{вх}$, R_1 , R_4 (Приложение А).

19. Рассчитать величину $U_{вых}$ неинвертирующего ОУ для своего варианта $U_{вх}$, R_1 , R_4 (Приложение А).

20. Рассчитать K_{oc} неинвертирующего ОУ для двух случаев K_{oy} ($K_{oy}=10000$, $K_{oy}=20000$). Взять R_1 и R_4 для своего варианта (Приложение А).

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА О ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Отчёт должен содержать:

- титульный лист;
- цель лабораторной работы;
- схемы экспериментов;
- таблицы и графики результатов;
- расчеты;
- выводы.

Отчёт по лабораторной работе должен быть выполнен в соответствии требованиями ГОСТ.

7. ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

Защита производится при наличии отчета и состоит в объяснениях полученных результатов и ответах на контрольные вопросы.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое ОУ?
2. Какие характеристики должен иметь идеальный ОУ?
3. Какие характеристики имеют реальные ОУ?
4. Что такое ООС?
5. Чем определяется глубина ООС?
6. Чем определяется K_{oc} ?
7. Как рассчитать цепи ООС для обеспечения заданной величины K_{oc} ?
8. Что показывает АЧХ ОУ?
9. Что такое частота единичного усиления?
10. Как построить логарифмическую АЧХ?
11. Как построить логарифмическую АЧХ с ООС?
12. От чего зависит максимальная величина $U_{вых. ОУ}$?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основы электротехники, микроэлектроники и управления в 2 т. Том 2: учебное пособие для академического бакалавриата [Электронный ресурс] / Ю. А. Комиссаров, Л. С. Гордеев, Г. И. Бабокин, Д. П. Вент. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2017. — 313 с. — (Серия: Бакалавр. Академический курс). — ISBN 978-5-534-05432-3. — Режим доступа: <https://www.biblio-online.ru/book/8EC6B1A3-1738-41C8-9162-64040F1017F4>.
2. Миловзоров, О. В. Электроника: учебник для прикладного бакалавриата [Электронный ресурс] / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. — 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2017. — 344 с. — (Серия: Бакалавр. Прикладной курс). — ISBN 978-5-534-00077-1. — Режим доступа: www.biblio-online.ru/book/F696F80B-830E-4E30-B5D5-46CD8BD69BCF.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(обязательное)

№ варианта	R1, кОм	R4, кОм	U _{вх.} , В	f _{вх.} , кГц	K _{ос}
1	1	12	0,07	10	5
2	2	15	-0,15	15	-6
3	3	20	0,2	20	7
4	4	25	-0,25	25	-8
5	5	30	0,3	30	9
6	6	35	-0,07	35	-10
7	7	40	0,15	10	11
8	8	12	-0,2	15	-12
9	9	15	0,25	20	13
10	10	20	-0,3	25	-14
11	1	25	0,07	30	15
12	2	30	-0,15	35	-16
13	3	35	0,2	10	17
14	4	40	-0,25	15	-18
15	5	12	0,3	20	19
16	6	15	-0,07	25	-20
17	7	20	0,15	30	21
18	8	25	-0,2	35	-22
19	9	30	0,25	10	23
20	10	35	-0,3	15	-24
21	1	40	0,07	20	25
22	2	12	-0,15	25	-5
23	3	15	0,2	30	6
24	4	20	-0,25	35	-7
25	5	25	0,3	10	8

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Методические указания

Составитель: **Осадченко** Александр Евгеньевич

Издается в авторской редакции

Изд. № 202/19. Объем 1,5 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет"