

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»
(СПбГУТ)

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ СХЕМ НА ИНТЕГРАЛЬНОМ ОУ В ЧАСТОТНОЙ И
ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТЯХ

Вариант 234

Выполнила бригада:

Группа ИКТЗ-83

Громов А.А., Миколаени М.С., Мазеин Д.С.

(Ф.И.О., № группы)

(подпись)

Санкт-Петербург

2020

Лабораторная работа № 5
“Исследование схем на интегральном ОУ в частотной и временной областях”

Цель работы:

- Изучить схемотехнические особенности построения интегральных ОУ, принцип построения макромоделли в частотной области.
- Исследовать влияние внешних цепей ОС на характеристики устройств с ОУ.

Исходные данные:

Таблица 4

№	Тип ОУ	Частота единичного усиления (МГц)	Коэффициент усиления ОУ (дБ)	Скорость нарастания (В/мкс)	Максимальный выходной ток (мА)
2	ОРА646	650	47	180	52

Таблица 5

№	3
R, кОм	1.6
C, пФ	100

Таблица 6

№	4
R, кОм	4.7
C, нФ	68

2.1. Построение макромоделей ОУ с частотной коррекцией.

Модель, удобная для учебного процесса, показана на рис. 1. Элементы частотной коррекции не показаны. Схема, однако, обладает свойствами скорректированного ОУ, в частности ее характеристики определяются двумя полюсами в функции передачи.

Эта модель состоит из трех блоков, построенных на идеальных операционных усилителях. Первый (ОУ1) обеспечивает дифференциальный вход устройства с бесконечно большим входным сопротивлением. Третий (ОУ3) обеспечивает нулевое выходное сопротивление и служит буфером между выходом макромоделей и внешними цепями. Частотные свойства в предложенной макромоделе ОУ определяются двумя парами ВС-элементов на выходах ОУ1 и ОУ2 (узлы 4 и 5). Общий коэффициент усиления макромоделей ОУ указывается над ОУ1. Другие блоки имеют коэффициент усиления равный 1.

Задание 1.

Составим макромодель по заданным параметрам:

Коэффициент усиления ОУ μ указывается над ОУ1, другие блоки имеют усиление 1. Ёмкости, связанные с частотами полюсов, определяются из выражения $C_i = 1/2f_{pi}R$.

$$f_1 = 650 \text{ МГц}$$

$$\text{КдБ} = 47 \text{ дБ}$$

$$\mu = 224$$

$$f_{p1} = 2.9 \text{ МГц}$$

$$f_{p2} = f_1 \cdot 2 = 1.3 \text{ ГГц}$$

$$C_i = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot f_{pi} \cdot R$$

$$C_1 = 55 \text{ нФ}$$

$$C_2 = 0.1224 \text{ пФ}$$

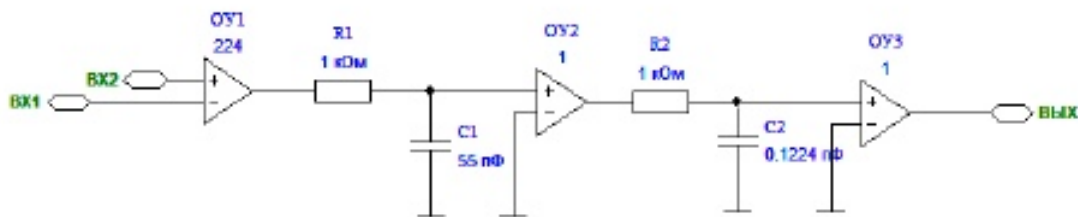


Рис. 1: Макромодель с параметрами элементов, задающих частотные свойства ОУ.

3.2.1. Схемы на ОУ с частотно-независимой ОС.

Неинвертирующий усилитель с ОС изображен на рис. 2, а. В этой схеме сигнал подается на прямой вход ОУ. Напряжение отрицательной ОС поступает на инверсный вход ОУ. Цепь ОС из резисторов R1 и R2 образует последовательную ОС по входу и параллельную по выходу. Коэффициент усиления K_{FH} этой структуры записан под схемой. Здесь и собственный коэффициент усиления ОУ без ОС, F - глубина ОС.

Инвертирующий усилитель с ОС изображен на рис. 2, б. В этой схеме сигнал через резистор R1 подается на инверсный вход ОУ. На этот же вход должен поступать и сигнал ОС, иначе она не будет отрицательной. Таким образом, и в инвертирующем включении ОУ цепь ОС образуется резисторами R1 и R2. При этом получается параллельная по инверсному входу ОУ и параллельная по выходу ОС. Коэффициент усиления K_{FH} этой структуры также записан под соответствующей схемой. Глубина ОС в обеих схемах одинакова.

$$K_{FH} = \frac{\mu}{F} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}; K_{Fi} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{\mu}{F} \approx \frac{R_2}{R_1}$$

$$F = 1 + \mu B = 1 + \mu \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

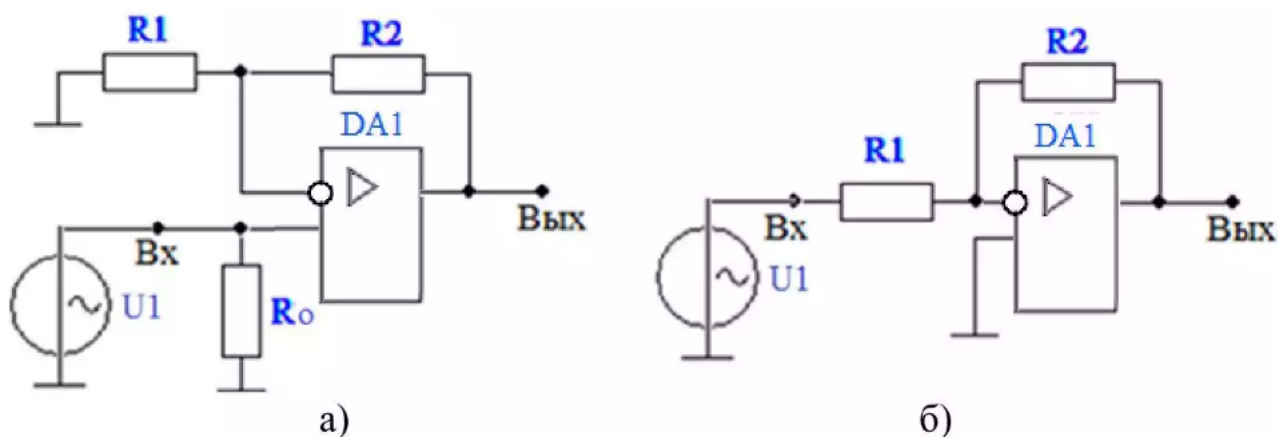


Рис. 2: Основные схемы включения операционных усилителей.

3.2.1.1. Характеристики в частотной области.

Режим без ОС можно создать, подключив к одному из входов подсистемы ОУ (рис. 3) источник гармонического сигнала (с амплитудой 1...2 мВ) и заземлив другой. В этом случае исследованию подвергается собственно сама микросхема ОУ.

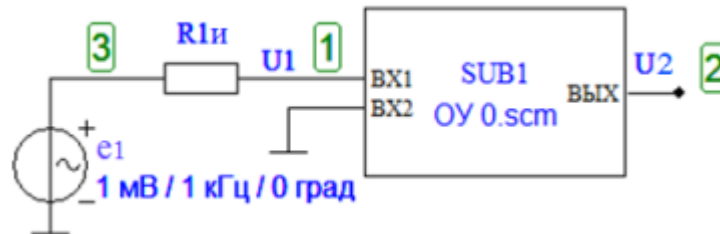


Рис. 3: Схема включения ОУ без ОС.

Задание 2.

Построить АЧХ ОУ без ОС, определить коэффициент усиления μ на нижних частотах (20...80 Гц), частоты полюсов и частоту единичного усиления f_1 .

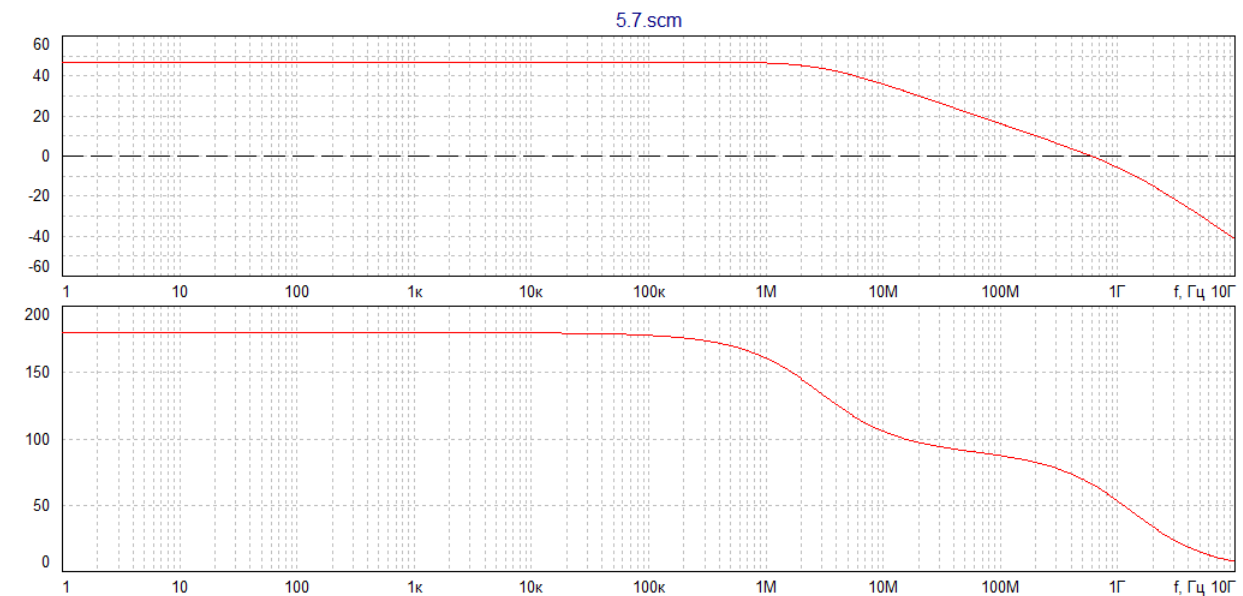


Рис. 4: Частотные характеристики ОУ.

$$\mu = 224, f_{P1} = 2.9 \text{ МГц}, f_{P2} = 1.3 \text{ ГГц}, f_1 = 640 \text{ МГц}$$

Режим ОУ с ОС получается при подключении к под схеме резисторов ОС R1 и R2 (рис. 5). Для получения заданных коэффициентов усиления с ОС K_F , равными 100 и 10, необходимо включить требуемые сопротивления резисторов ОС. Их можно рассчитать, приняв $R1 = 1...2 \text{ кОм}$.

Если источник сигнала подключается к инверсному входу ОУ через резистор R1. Получаем инвертирующий усилитель (рис. 5).

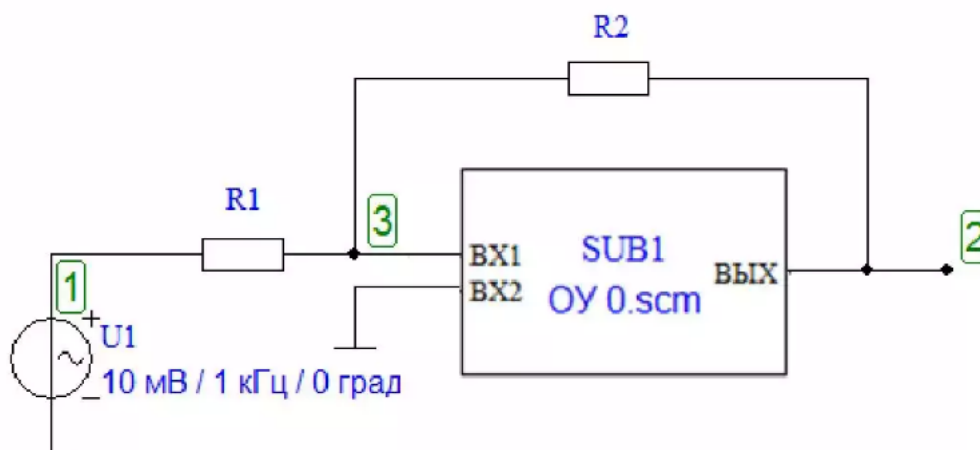


Рис. 5: Инвертирующий усилитель.

Вывод по заданию:

- Рассчитанные и полученные по АЧХ частоты полюсов совпадают, а частота единичного усиления практически совпадает с теоретической.
- Условия сдвига фаз по ФЧХ для каждого полюса совпадают с теоретическими требованиями к фЧХ двуполюсного усилителя.

Задание 3.

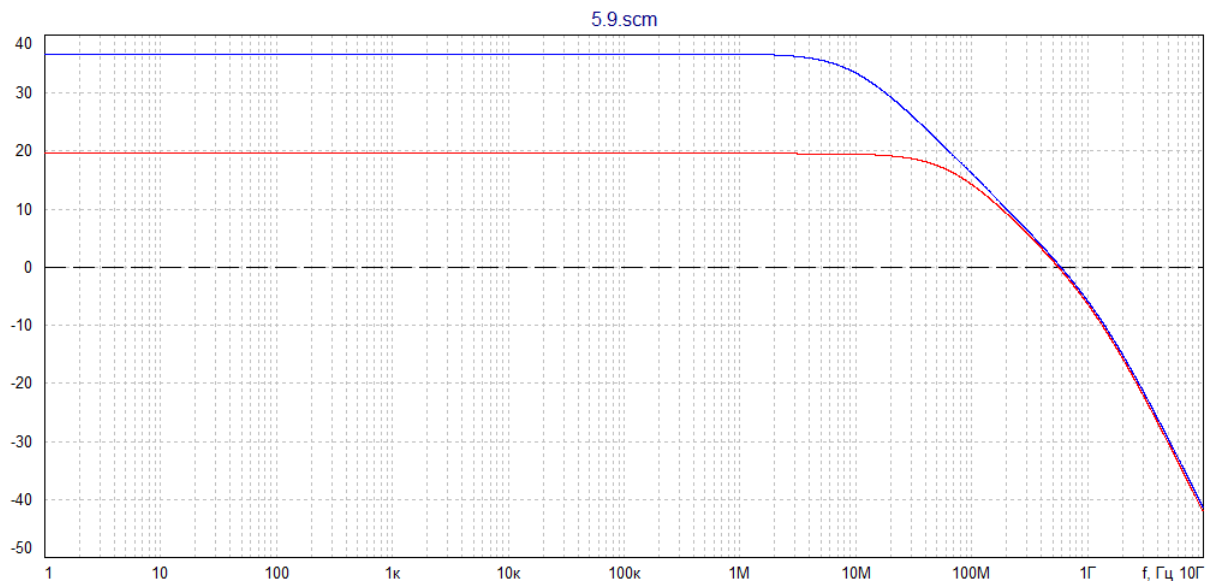


Рис. 6: График АЧХ. Красная линия- $K_F=10$; $f_{\text{гран}}=64\text{МГц}$ | Синяя линия- $K_F=100$; $f_{\text{гран}}=9.3\text{ МГц}$.

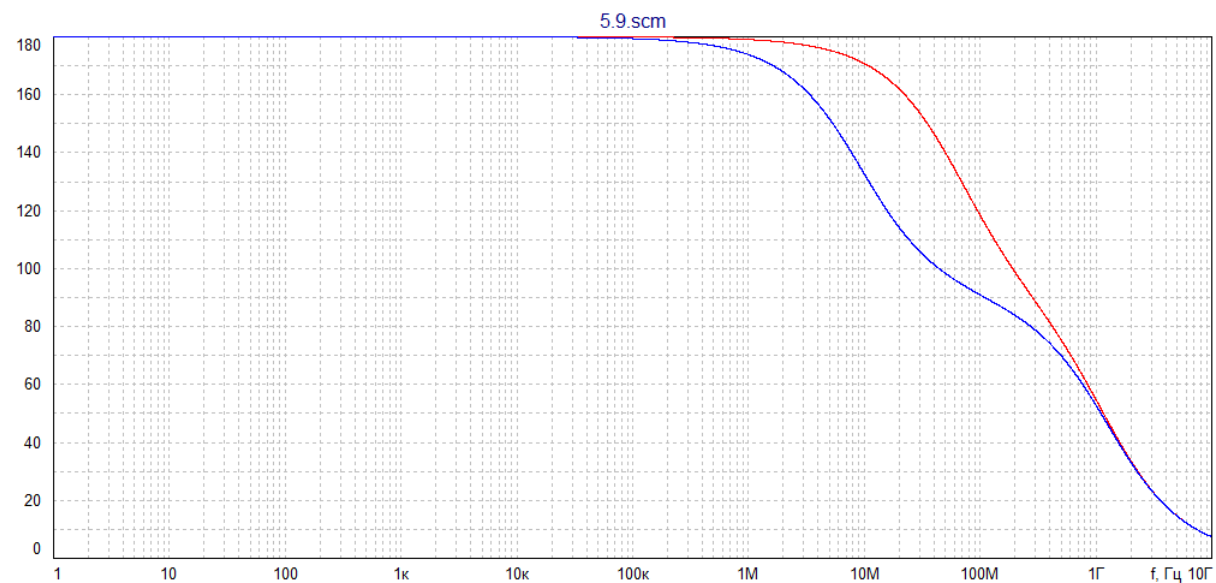


Рис. 7: График ФЧХ. Красная линия - $K_F=10$, Синяя линия- $K_F=100$.

Вывод по заданию:

- Значения коэффициента усиления, полученные по АЧХ и теоретически рассчитанные, практически совпадают. При этом отношение рассчитанных K_{f1} и K_{f2} и полученных из АЧХ совпадают.

- При увеличении F наблюдается уменьшение рабочего диапазона частот.

Задание 4.

Инвертирующий усилитель с высоким входным сопротивлением

Для получения высокого входного сопротивления в инвертирующем усилителе используется Т-образная цепь ОС. Резисторы, подключаемые ко входу ОУ, выбираются высокоомными (например 1 МОм). Два других используются для управления коэффициентом усиления.

Коэффициент усиления такой схемы рассчитываются следующим образом:

$$K_F = \frac{\mu(R_4(R_5+R_6)+R_5R_6)}{\mu R_3R_6+(R_3+R_4)(R_5+R_6)+R_5R_6} \approx \frac{(1+\frac{R_5}{R_6})R_4}{R_3}$$

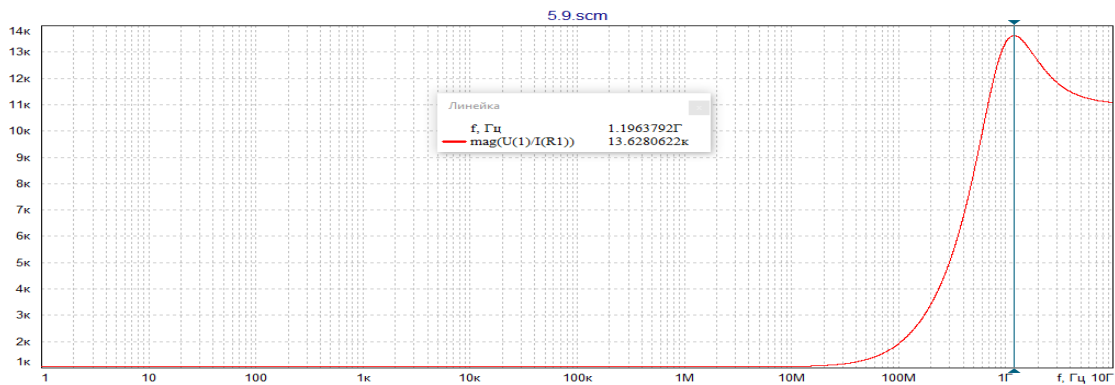


Рис. 8: График входного сопротивления инвертирующего усилителя.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя равно 13,6кОм

Вывод по заданию:

- Входное сопротивление инвертирующего усилителя, вычисленное в Fastmean, практически совпадает с теоретическим.

Задание 5.

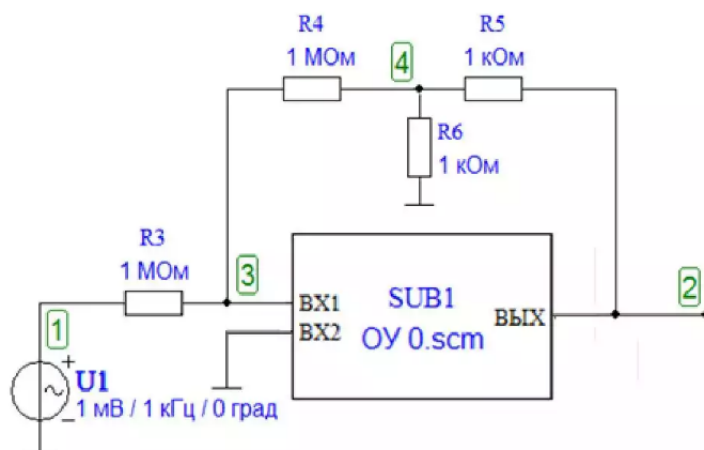


Рис. 9: Инвертирующий ОУ с высоким входным сопротивлением.

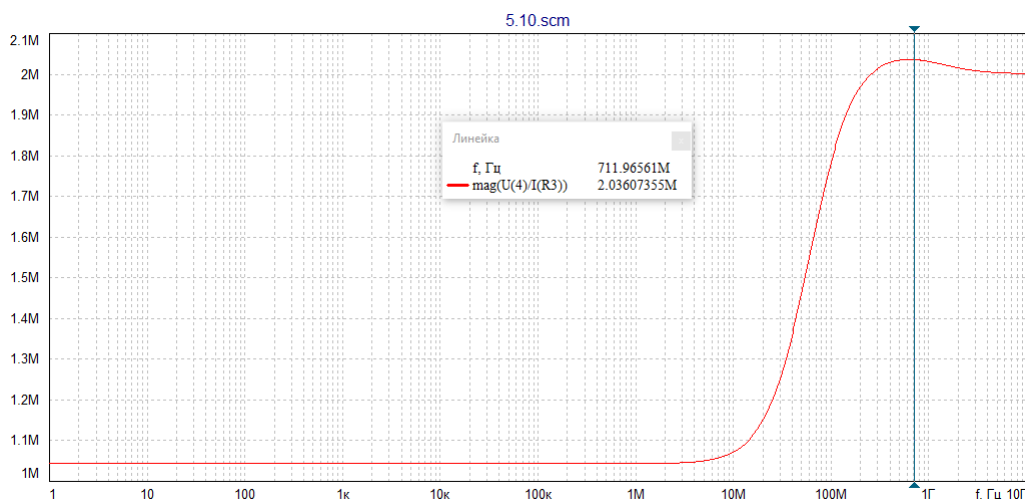


Рис. 10: График входного сопротивления.

Входное сопротивление инвертирующего ОУ с высоким входным сопротивлением равно 2.04 МОм.

Рассчитать элементы цепи ОС по заданному коэффициенту усиления $K_F = 100$ и $K_F = 10$.

$$K_F = 10$$

$$K_F = (1 + R_5/R_6) \cdot R_4/R_3$$

$$R_3 = 1000 \text{ Ом}$$

$$R_3 = R_4 = 1 \text{ МОм}$$

$$R_5 = 9 \cdot R_6 = 9 \text{ кОм}$$

$$K_F = 100$$

$$K_F = (1 + R_5/R_6) \cdot R_4/R_3$$

$$R_3 = 1000 \text{ Ом}$$

$$R_3 = R_4 = 1 \text{ МОм}$$

$$R_5 = 99 \cdot R_6 = 99 \text{ кОм}$$

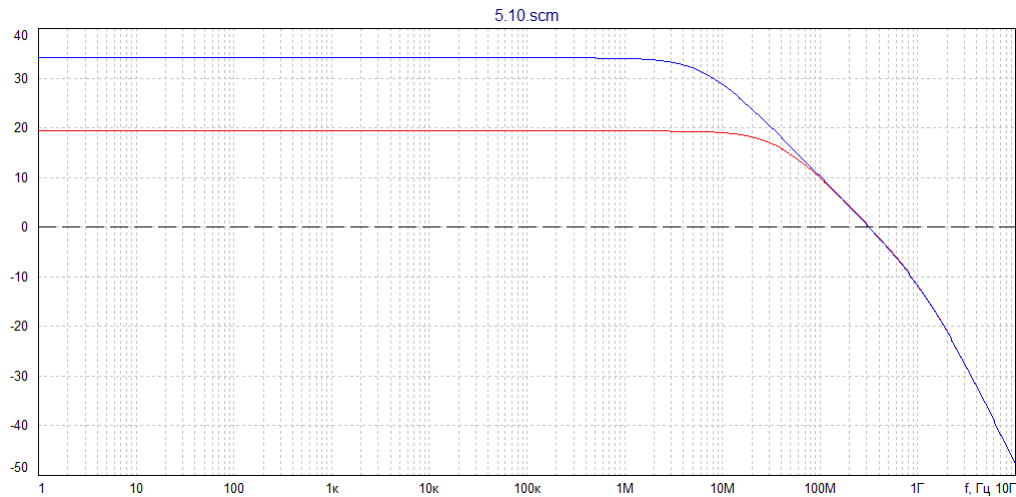


Рис. 11: График АЧХ. Красная линия - $K_F=10$, Синяя линия - $K_F=100$.

Неинвертирующий усилитель на ОУ получается при подаче сигнала на его прямой вход. На практике вызывает интерес частный случай такого включения — операционный повторитель (ОП) (рис. 16).

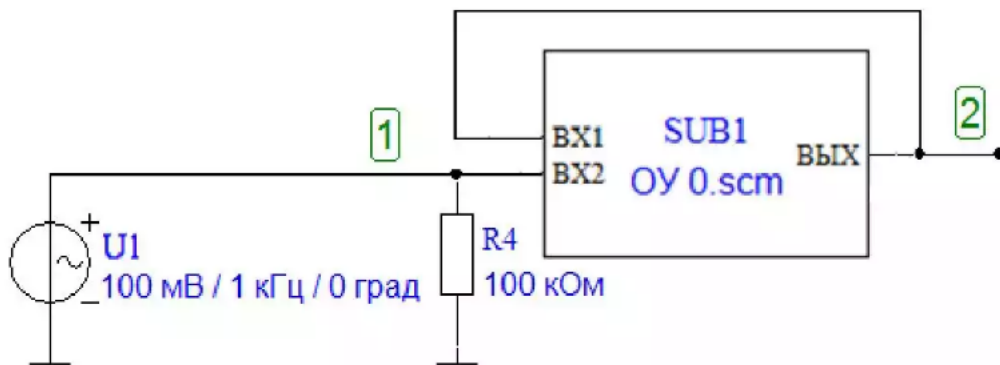


Рис. 12: График АЧХ. Красная линия - $F=10$, Синяя линия - $F=100$.

Режим ОП получается в неинвертирующем усилителе при $R_2 = 0$. Выход ОУ непосредственно соединяется с инверсным входом, использование резистора R_1 в этом случае теряет смысл. Резистор R_4 необходим для протекания входного постоянного тока ОУ. Его сопротивление может составлять десятки и сотни кОм. Оно определяет входное сопротивление ОП. При этом следует помнить о входных токах ОУ.

Вывод по заданию:

- Входное сопротивление инвертирующего усилителя с высоким входным сопротивлением почти на 3 порядка больше, чем у инвертирующего усилителя.

Задание 6.

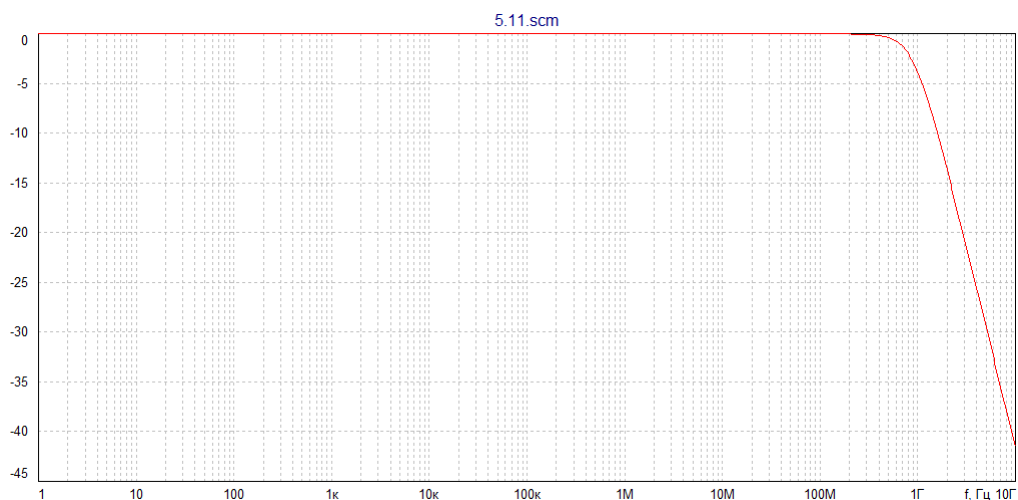


Рис. 13: График АЧХ ОП.

Вывод по заданию:

- В отличие от АЧХ усиления без ОС, АЧХ операционного повторителя имеет большую рабочую полосу частот, а максимум его АЧХ равен 0 дБ.

3.2.1.2. Характеристики во временной области.

Переходную характеристику (ПХ) усилителя получаем при подаче на его вход напряжения прямоугольной формы. Для этого в схемах на рис. 5 и 16 необходимо переключить источник сигналов с гармонических колебаний на меандр. Задать двухполярный сигнал ± 1 мВ и длительность импульса $t_{\text{и}} = 25$ мкс.

Задание 7.

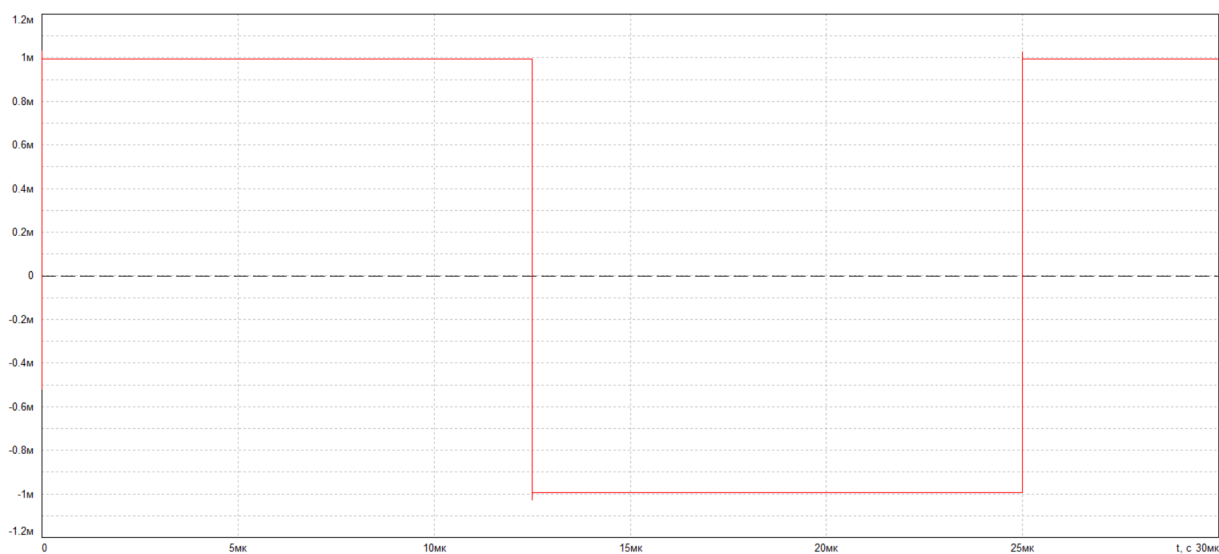


Рис. 14: График ПХ операционного повторителя.

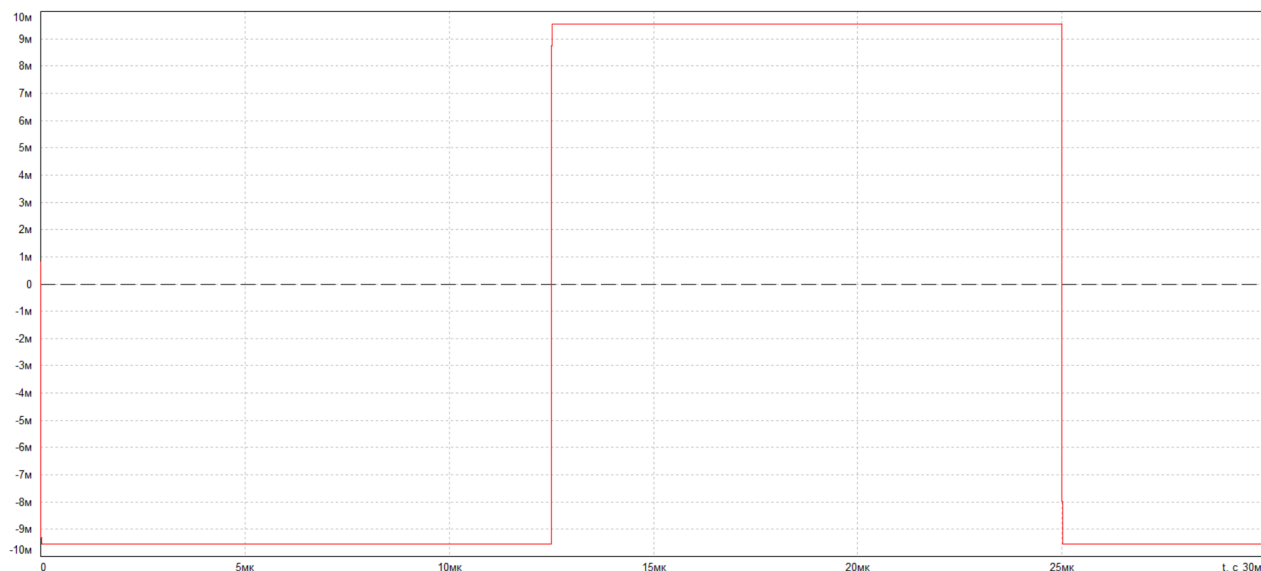


Рис. 15: График ПХ инвертирующего ОУ с высоким входным сопротивлением.

Вывод по заданию:

- По ПХ операционного повторителя видно, что она практически в точности повторяет входной сигнал источника напряжения.
- По ПХ инвертирующего усилителя можно сделать вывод о том, что данное устройство инвертирует входной сигнал и усиливает его в K_f раз.

3.2.2. Схемы на ОУ с частотно-зависимой ОС.

Из огромного разнообразия схем ОУ с частотно-зависимыми цепями ОС для лабораторного исследования выбраны только две.

Одна из них представляет собой интегратор (рис. 20, а), другая — дифференциатор (рис. 20, б). Соответствующие функции определяются RC-элементами. Резисторы R_0 выполняют вспомогательные функции. В интеграторе R_0 обеспечивает необходимую ОС на постоянном токе, в дифференциаторе — необходимый запас по фазе.

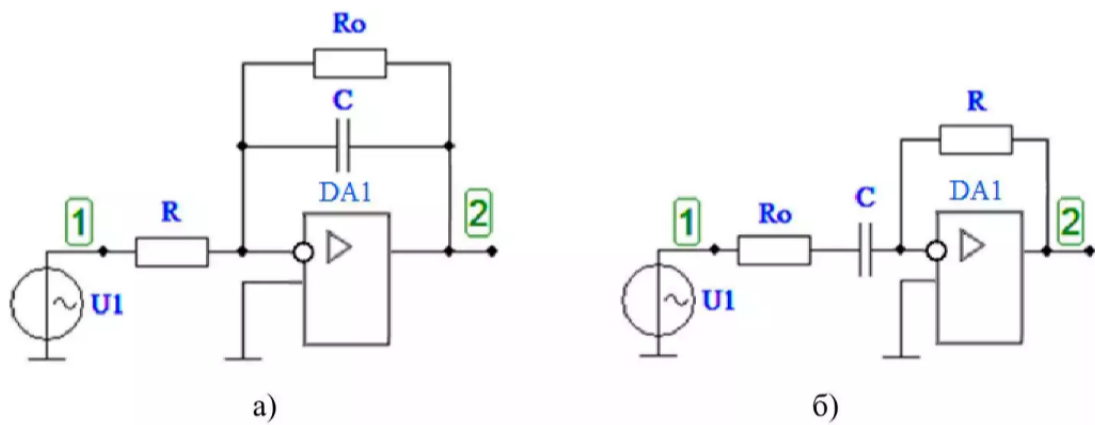


Рис. 16: ОУ в режиме интегрирования (а) и дифференцирования (б).

3.2.2.1. Характеристики в частотной области.

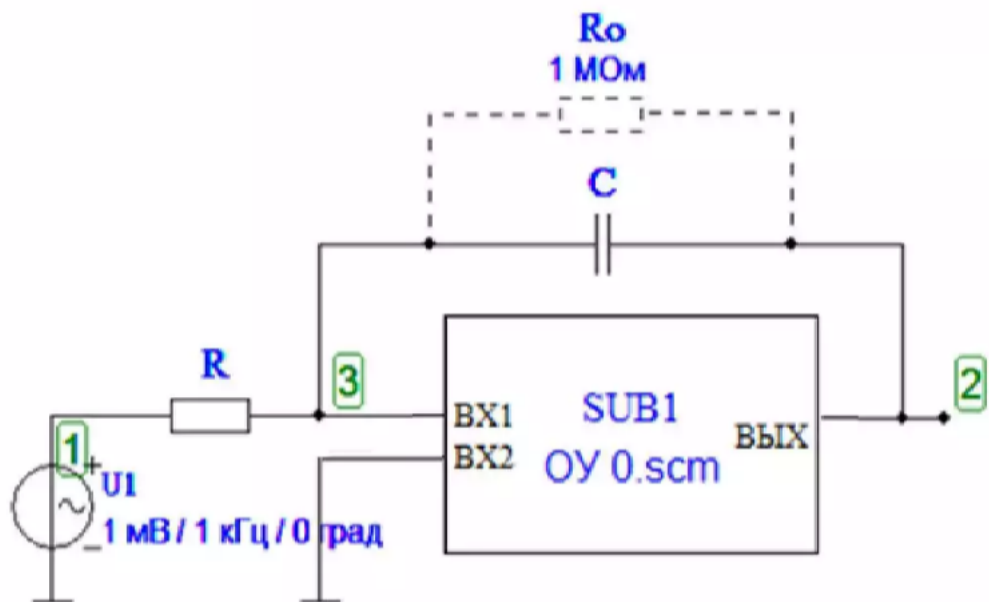


Рис. 17: Схема интегратора.

Задание 8.

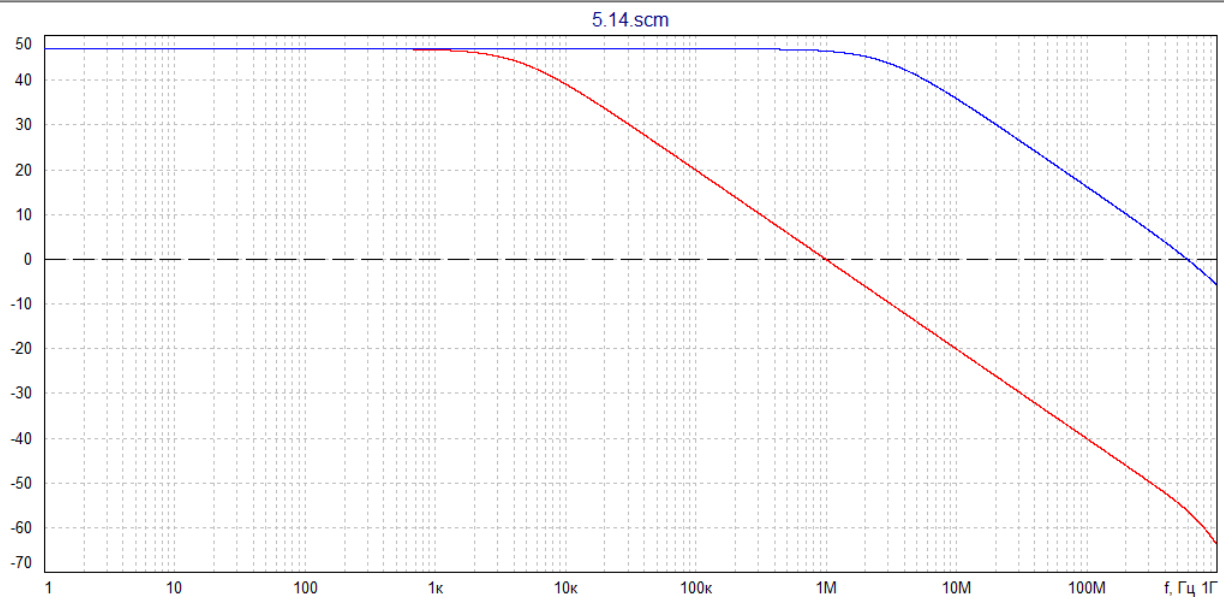


Рис. 18: График АЧХ интегратора (красная линия) и АЧХ ОУ без ОС (синяя линия).

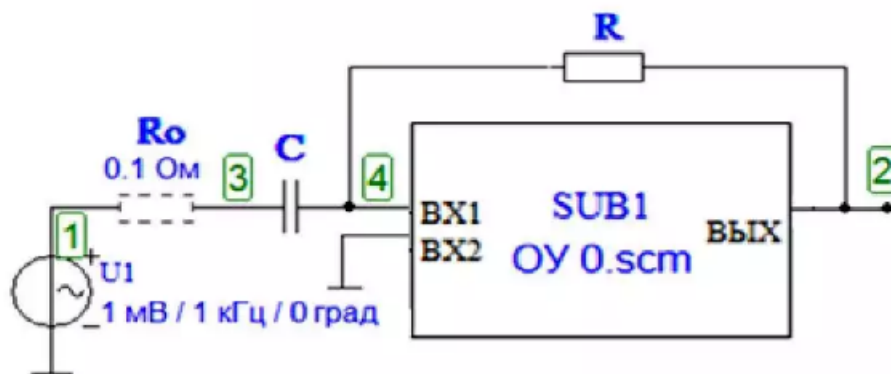


Рис. 19: Схема дифференциатора.

Вывод по заданию:

- По АЧХ схемы видно, что выполняется условие падения АЧХ на 6дБ/октава, а значит, что схема действительно работает как интегратор.

Задание 9.

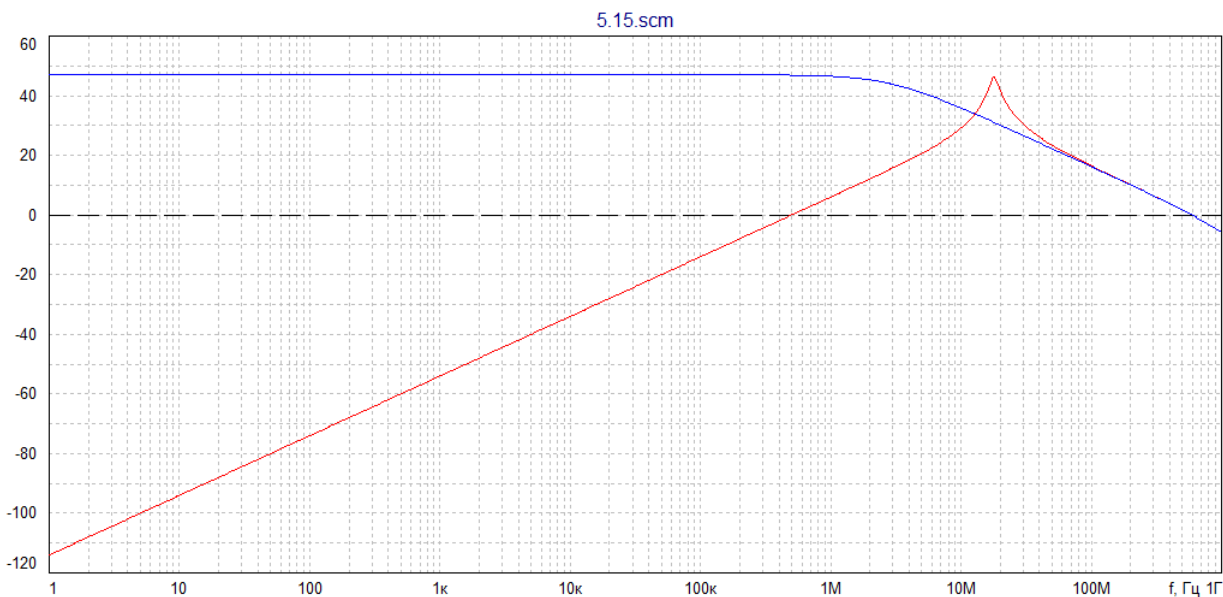


Рис. 20: График АЧХ дифференциатора (красная линия) и АЧХ ОУ без ОС (синяя линия).

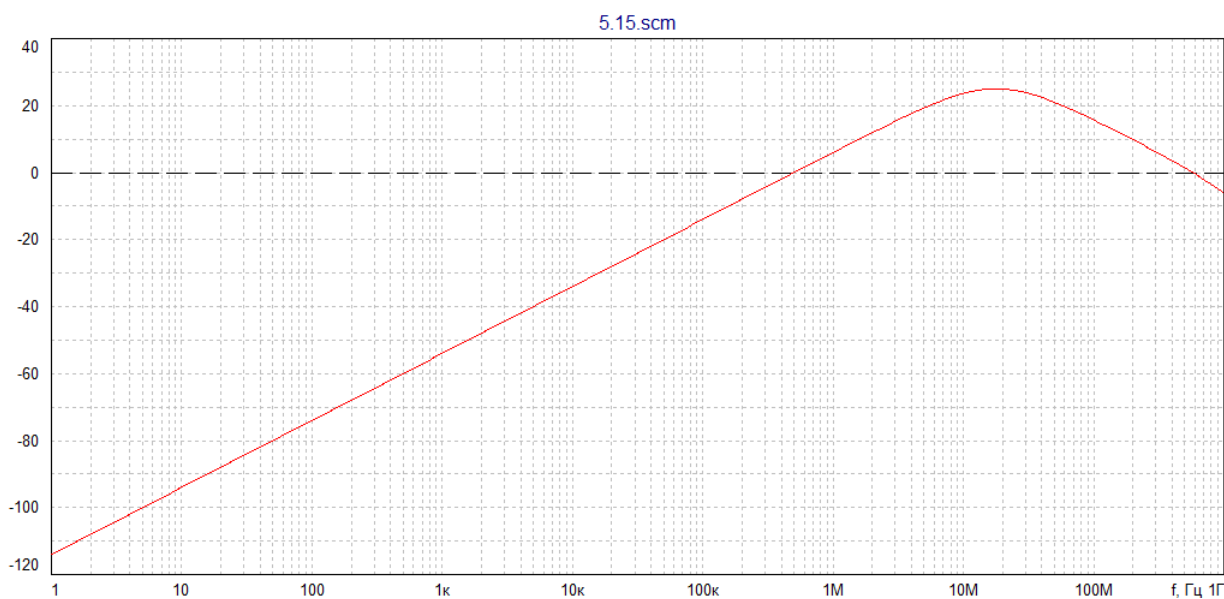


Рис. 21: График АЧХ дифференциатора при $R_0 = 240$ Ом – сопротивлении, при котором подъем на АЧХ перестает иметь место.

В реальной схеме с ОУ выполнить измерения с разомкнутой петлей ОС весьма сложно из-за чрезвычайно высокого коэффициента усиления ОУ и необходимости сохранения нулевых потенциалов на постоянном напряжении. Использование ПК существенно облегчает решение этой задачи. На рис. 26 показан вариант выполнения разрыва петли ОС на ПК в схеме на рис. 23.

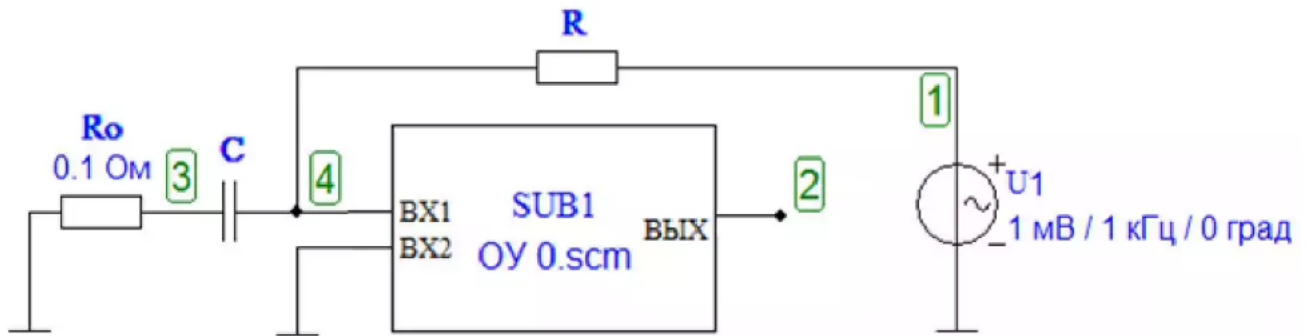


Рис. 22: Схема дифференциатора с разомкнутой петлей ОС.

Вывод по заданию:

- Изменение значения R_0 сглаживает выброс на АЧХ, а при значении $R_0 = 240$ Ом данный выброс перестает иметь место. Помимо этого, данное сопротивление не оказывает никакого влияния на рабочий диапазон частот.

Задание 10.

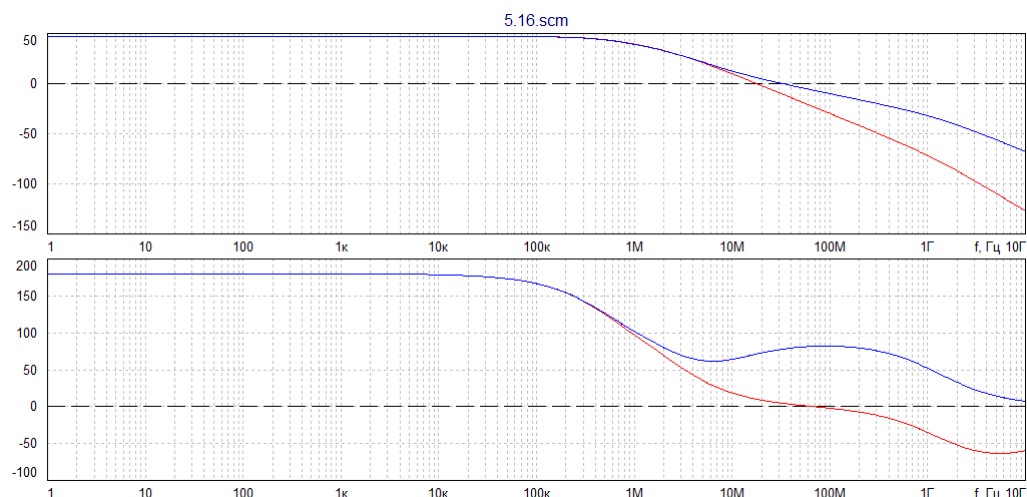


Рис. 23: График АЧХ петлевого усиления дифференциатора Красная линия – $R_0=0.1$ Ом, синяя линия - $R_0=240$ Ом.

Линейка		Линейка	
$R(R_0)$, Ом	0.1	$R(R_0)$, Ом	240
f , Гц	17.5328476M	f , Гц	33.1506313M
$\text{db}(\text{mag}(U(4)/U(3)))$	0.303056366	$\text{db}(\text{mag}(U(4)/U(3)))$	-0.122196933
Линейка		Линейка	
$R(R_0)$, Ом	0.1	$R(R_0)$, Ом	240
f , Гц	17.5328476M	f , Гц	33.1506313M
$\text{phs}(U(4)/U(3))$	10.2698115	$\text{phs}(U(4)/U(3))$	77.9539595

Рис. 24: Значения АЧХ и ФЧХ, при значении АЧХ = 0Дб

Вывод по заданию:

- Изменение R_0 практически не влияет на значение частоты единичного усиления, а на ФЧХ происходит значительное изменение запаса устойчивости по фазе. При этом, чем больше данный запас, тем устойчивее усилитель.

3.2.2.2. Характеристики во временной области.

Переходную характеристику (ПХ) получаем при подаче на вход исследуемой схемы напряжения прямоугольной формы. Для этого в схемах на рис. 21 и 23 необходимо переключить источник сигналов с гармонических колебаний на меандр. Задать двухполярный сигнал ± 1 мВ. Частота следования прямоугольных импульсов устанавливается в зависимости от их длительности импульса $t_{\text{и}} = \frac{1}{2f}$ для интегратора и для дифференциатора $t_{\text{и}} = 500$ мкс.

Задание 11.

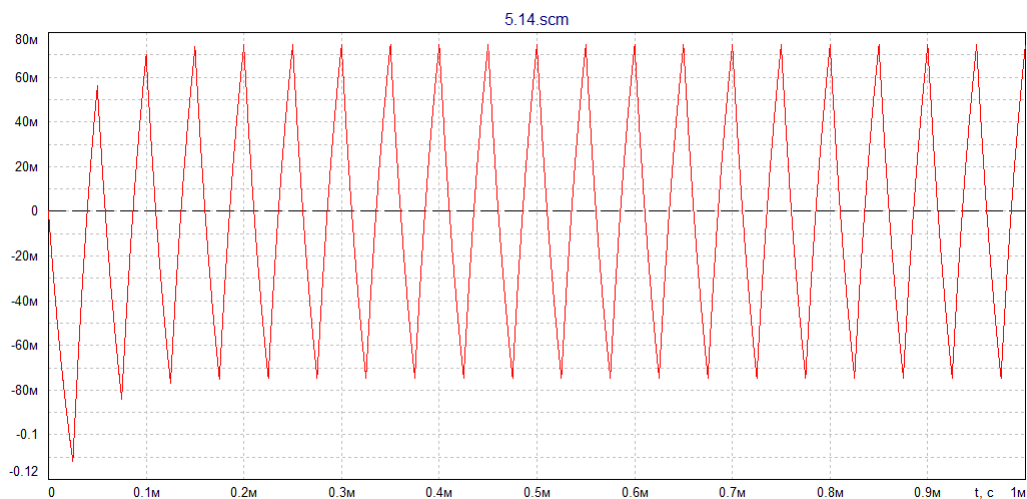


Рис. 25: График линейного закона интегрирования.

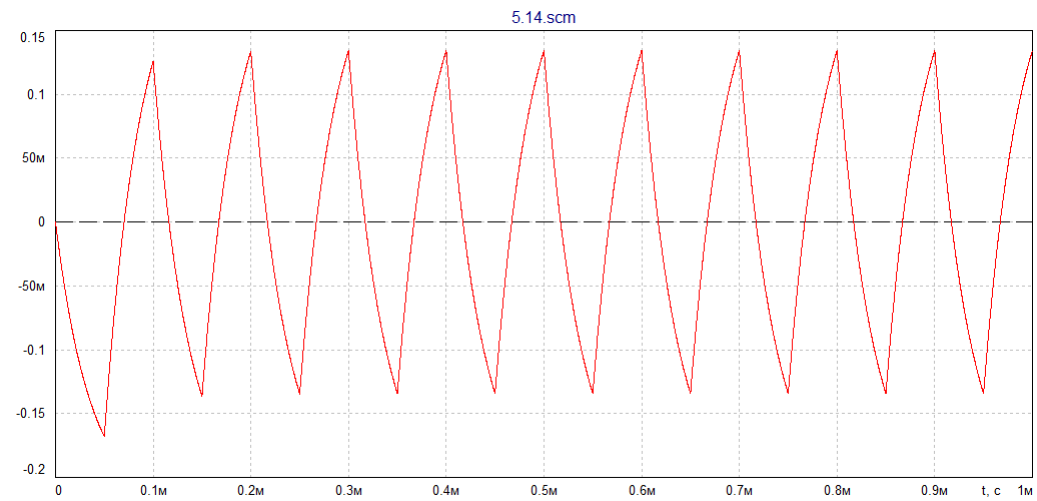


Рис. 26: График экспоненциального закона интегрирования.

$t_{\text{имакс}} = 500 \text{ мкс}$

Вывод по заданию:

- При увеличении длительности импульса, линейный закон интегрирования переходит в экспоненциальный.
- При подаче на вход интегратора прямоугольных импульсов на выходе наблюдается пилообразный сигнал

Задание 12.

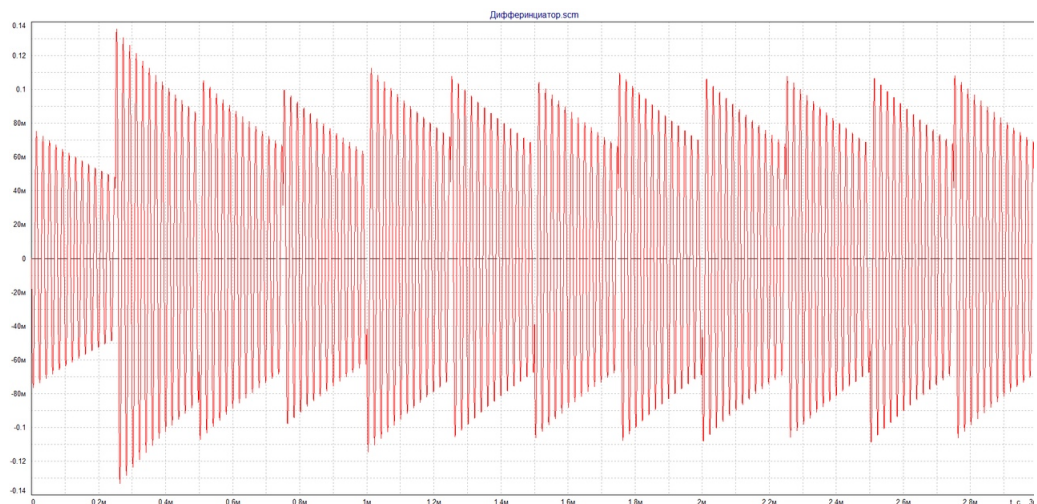


Рис. 27: График ПХ при $R_0 = 0.1 \text{ Ом}$, запас устойчивости по фазе равен 10 градусов.

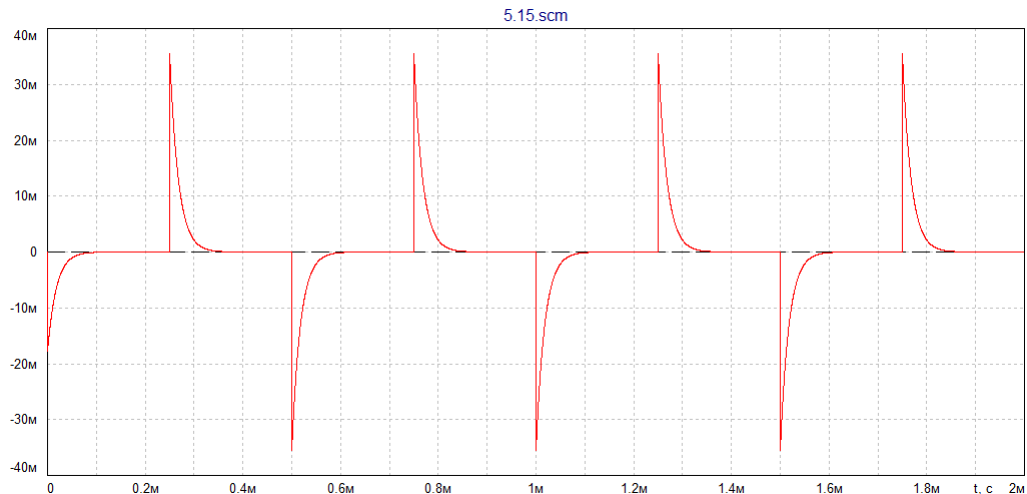


Рис.28: График ПХ при $R_0 = 240$ Ом, запас устойчивости по фазе 78 градусов.

Вывод по заданию:

- По полученным ПХ, можно сделать вывод о том, что перед нами дифференциатор. Изменение запаса по фазе влияет на его ПХ, а именно при $R_0=0.1$ Ом (усилитель практически самовозбужден) наблюдается потеря устойчивости и искажение выходного сигнала, а при $R_0=240$ Ом его выходная характеристика практически точно отображает дифференцированное значение сигнала.

Вывод: во время выполнения лабораторной работы были изучены схемотехнические особенности построения интегральных ОУ, принцип построения макромоделей в частотной области и исследованы влияние внешних цепей ОС на характеристики устройств с ОУ.