

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, пФ	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 $C_i = 1/2f_{pi}R$.

$$f_1 = 650 \text{ МГц}$$

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

$$K_{дБ} = 47 \text{ дБ}$$

$$C_i = 1/2\pi f_{pi}R$$

$$\mu = 224$$

$$C_1 = 800 \text{ нФ}$$

$$f_{p1} = 200 \text{ ГГц}$$

$$C_2 = 20 \text{ пФ}$$

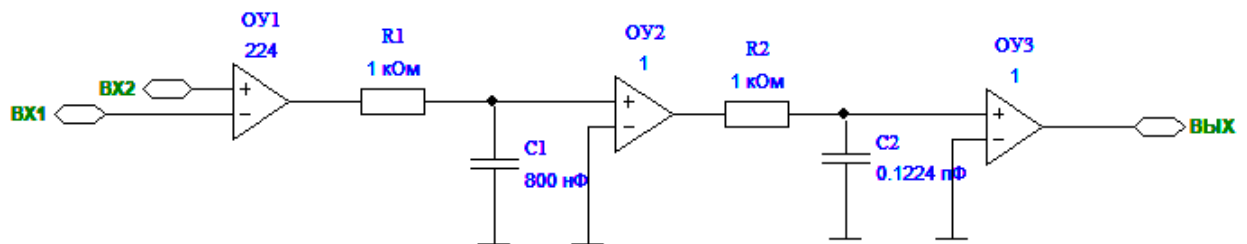


Рис. 1: Макромодель с параметрами элементов, задающих частотные свойства ОУ.

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.

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

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

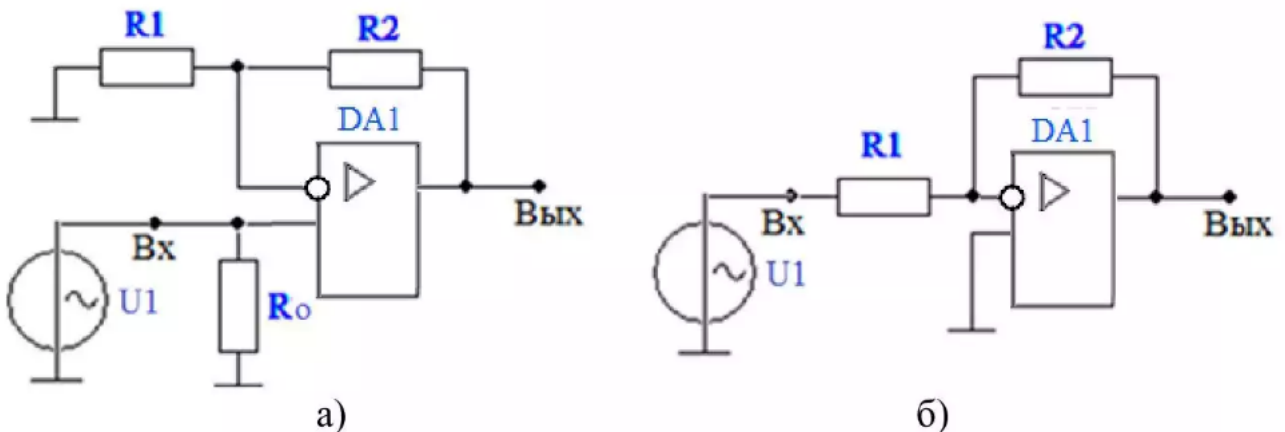


Рис. 2: Основные схемы включения операционных усилителей.

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.

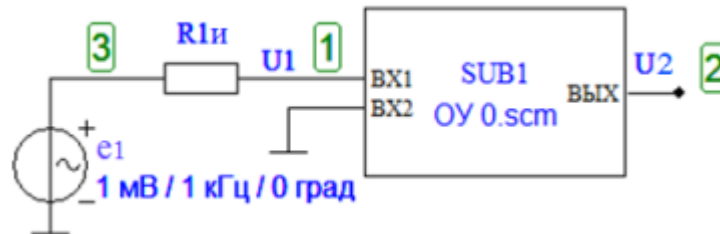


Рис. 3: Схема включения ОУ без ОС.

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 .

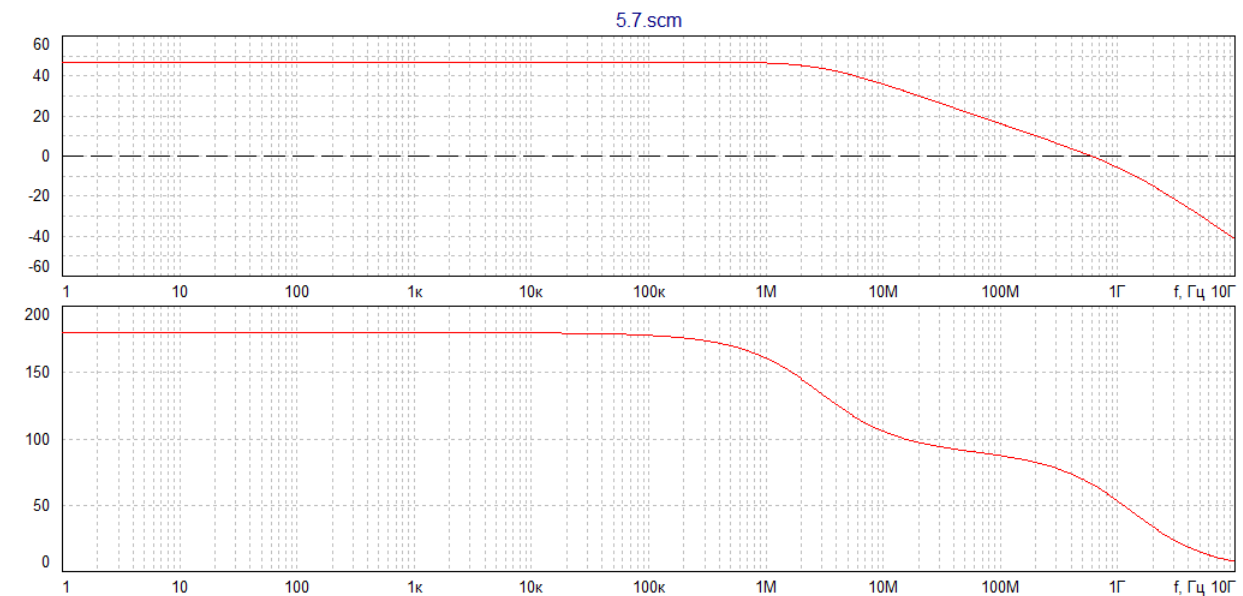


Рис. 4: Частотные характеристики ОУ.

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

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).

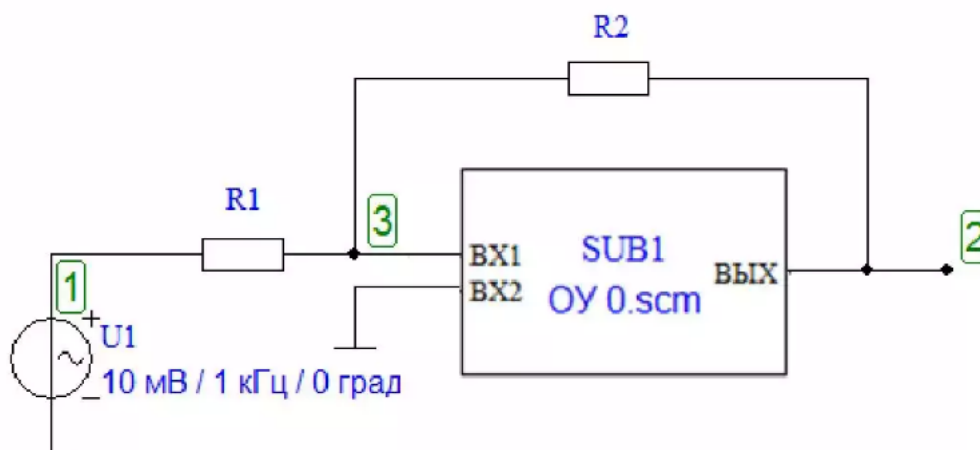


Рис. 5: Инвертирующий усилитель.

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.

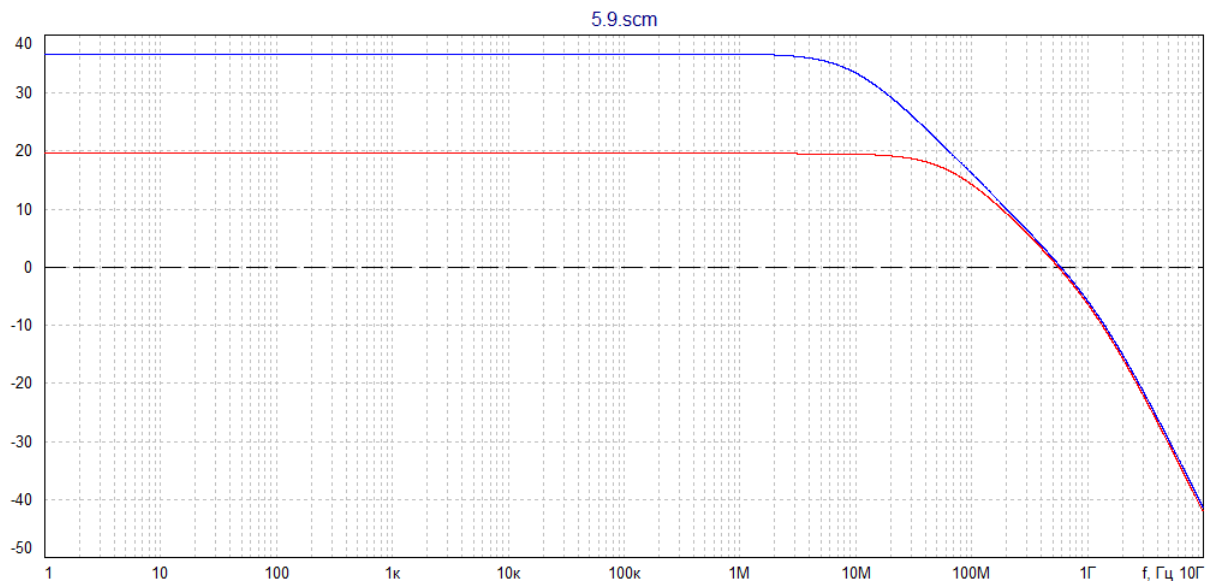


Рис. 6: График АЧХ. Красная линия- $K_F=10$; $f_{\text{гран}}=64\text{МГц}$ | Синяя линия- $K_F=100$; $f_{\text{гран}}=9.3\text{ МГц}$.

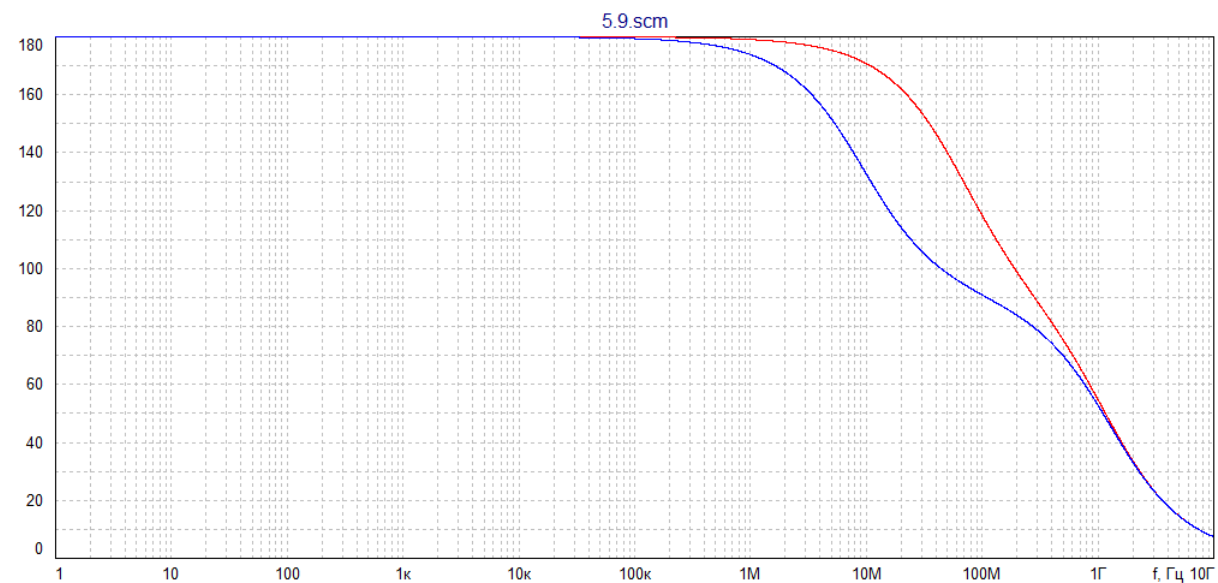


Рис. 7: График ФЧХ. Красная линия - $K_F=10$, Синяя линия- $K_F=100$.

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.

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:

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

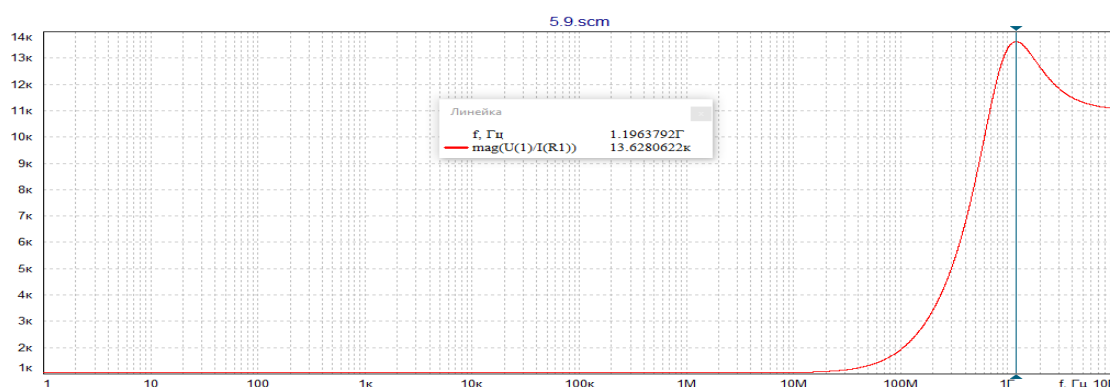


Рис. 8: График входного сопротивления инвертирующего усилителя.

Входное сопротивление инвертирующего усилителя равно 13,6кОм

Вывод по заданию:

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

Задание 5.

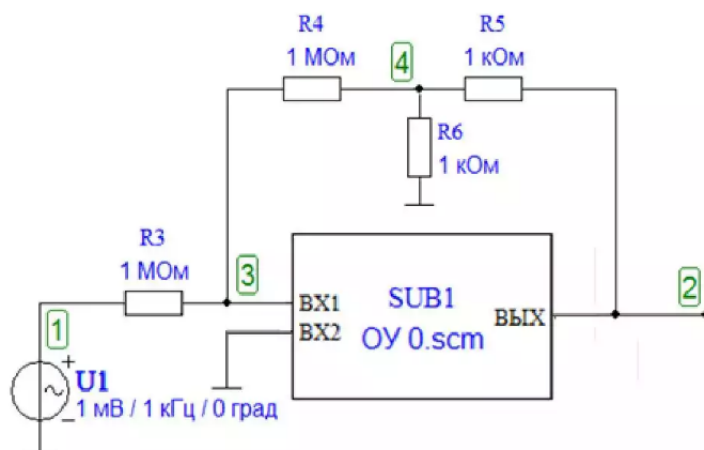


Рис. 9: Инвертирующий ОУ с высоким входным сопротивлением.

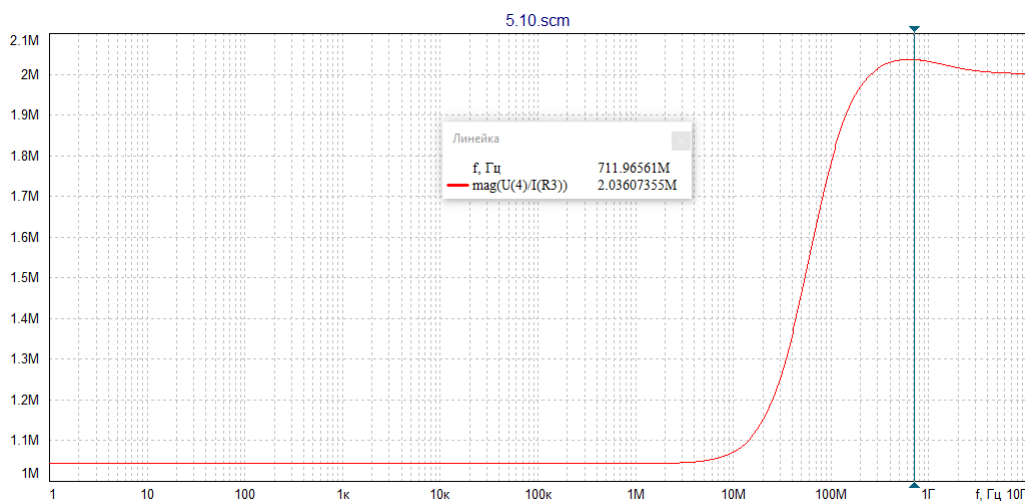


Рис. 10: График входного сопротивления.

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

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

$K_F = 10$

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

$$R_3 = 1000 \text{ Ом}$$

$$R_3 = R_4 = 1 \text{ МОм}$$

$$R_5 = 9 * R_6 = 9 \text{ кОм}$$

$K_F = 100$

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

$$R_3 = 1000 \text{ Ом}$$

$$R_3 = R_4 = 1 \text{ МОм}$$

$$R_5 = 99 * R_6 = 99 \text{ кОм}$$

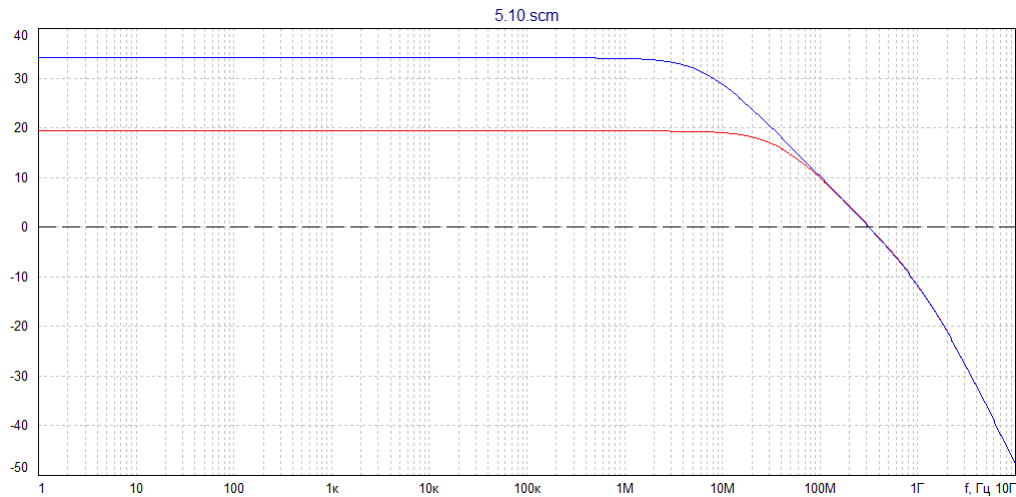


Рис. 11: График АЧХ. Красная линия - $KF=10$, Синяя линия- $KF=100$.

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).

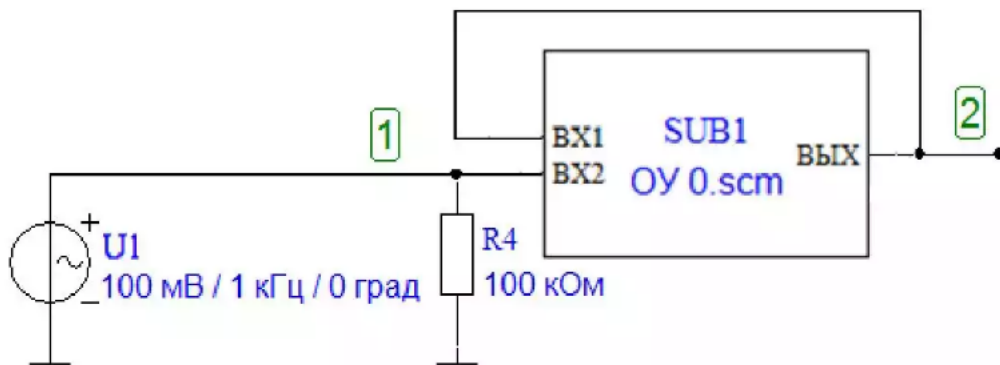


Рис. 12: График АЧХ. Красная линия - $KF=10$, Синяя линия- $KF=100$.

Режим ОП получается в неинвертирующем усилителе при $R2 = 0$. Выход ОУ непосредственно соединяется с инверсным входом, использование резистора $R1$ в этом случае теряет смысл. Резистор $R4$ 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.

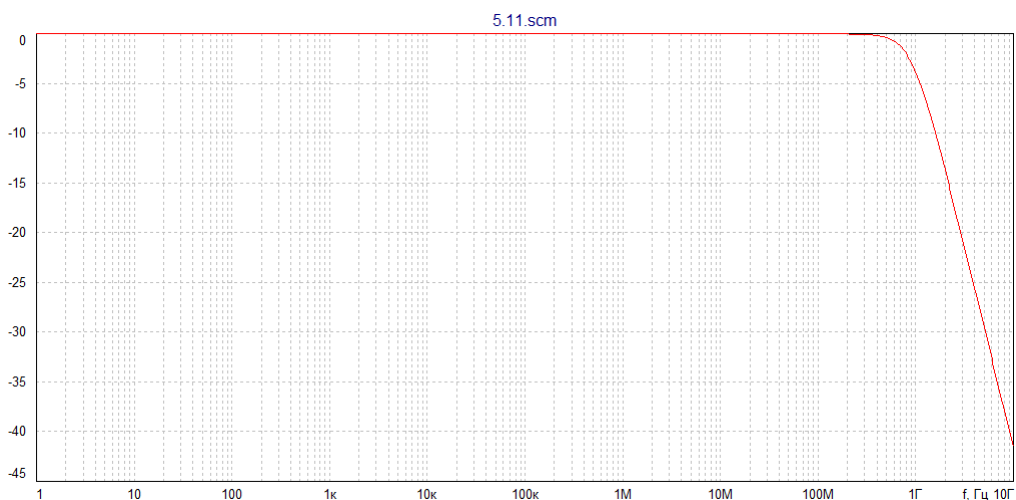


Рис. 13: График АЧХ ОП.

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.

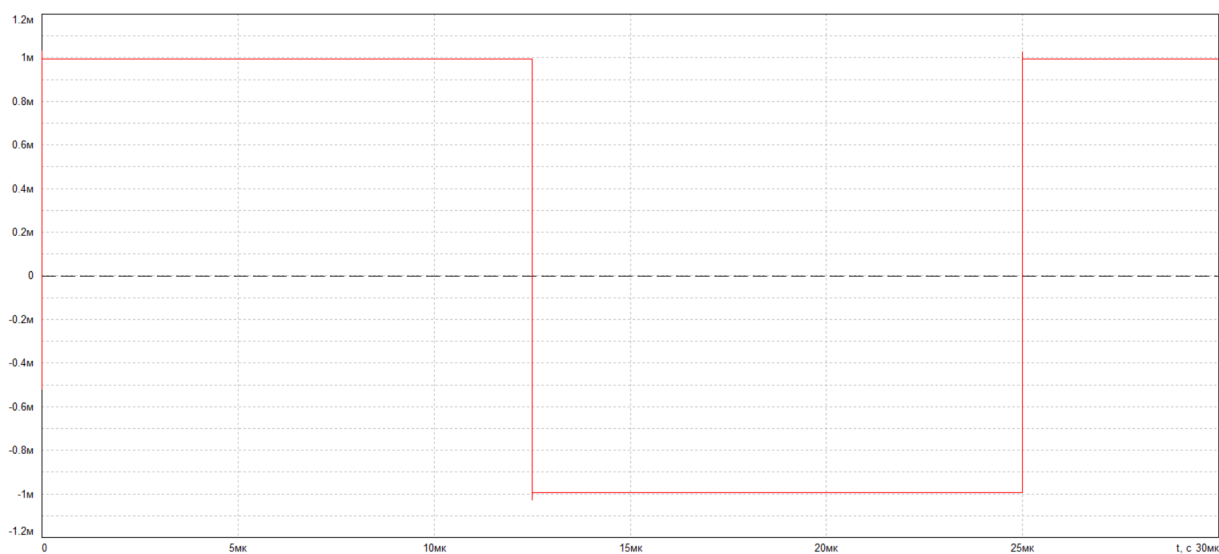


Рис. 14: График ПХ операционного повторителя.

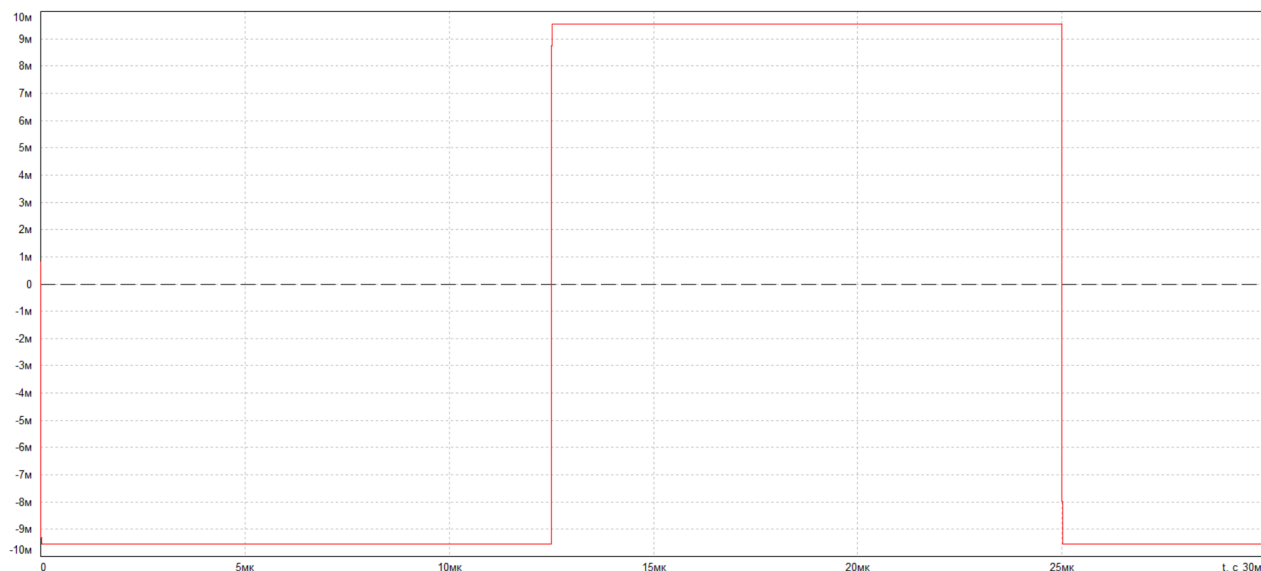


Рис. 15: График ПХ инвертирующего ОУ с высоким входным сопротивлением.

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.

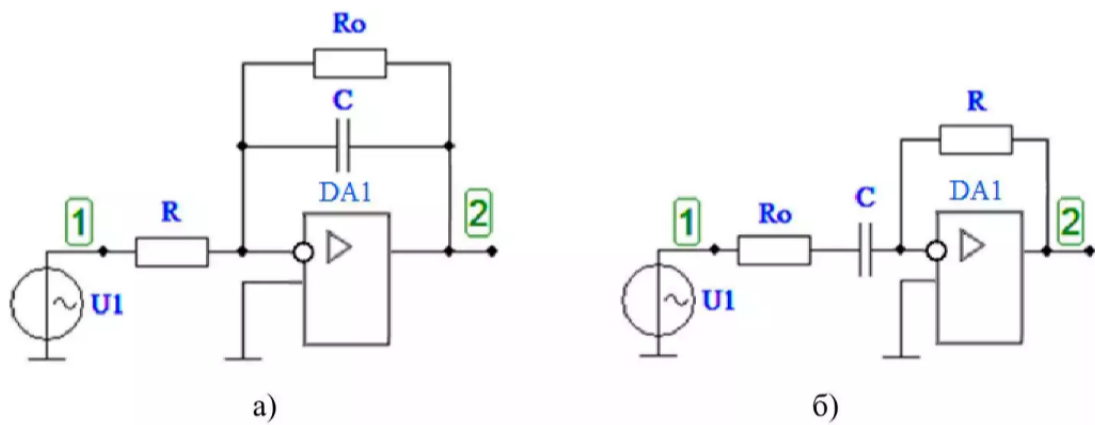


Рис. 16: ОУ в режиме интегрирования (а) и дифференцирования (б).

3.2.2.1. Характеристики в частотной области.

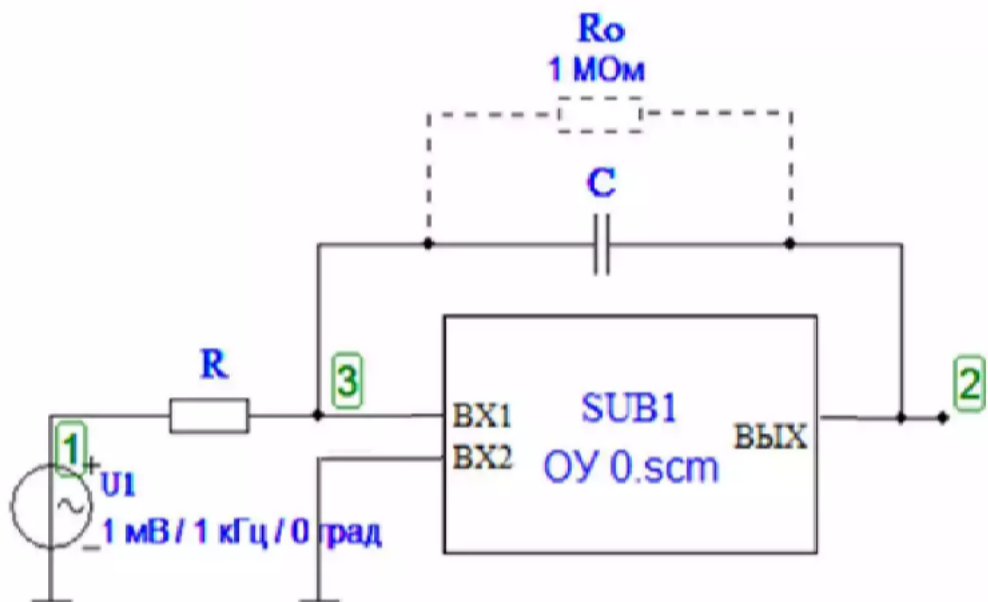


Рис. 17: Схема интегратора.

Задание 8.

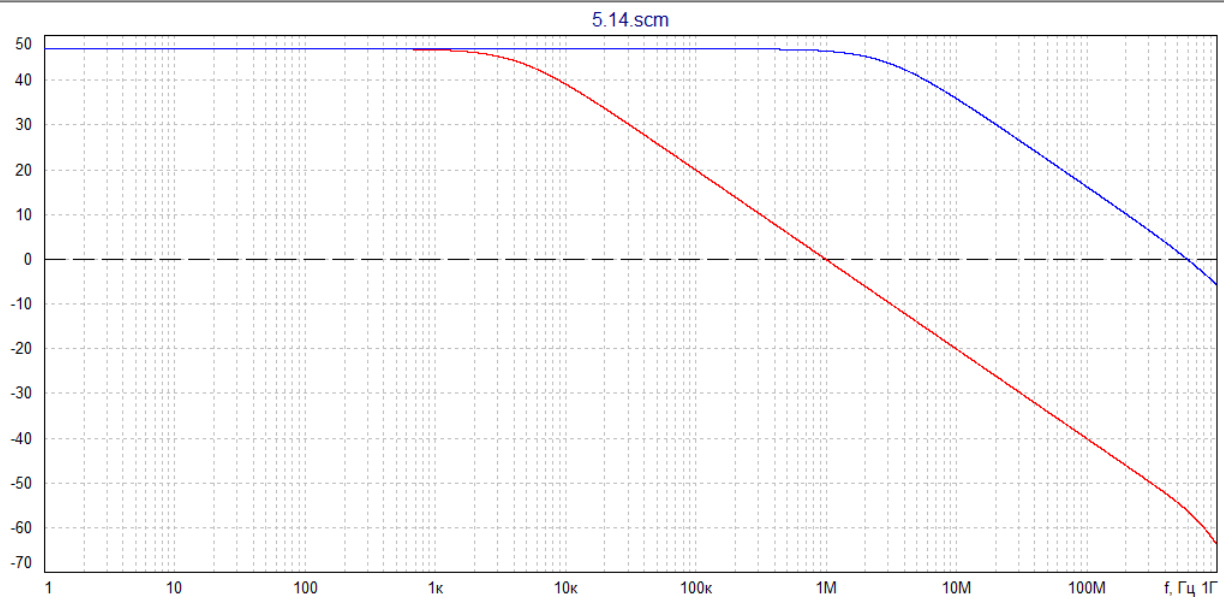


Рис. 18: График АЧХ интегратора (красная линия) и АЧХ ОУ без ОС (синяя линия).

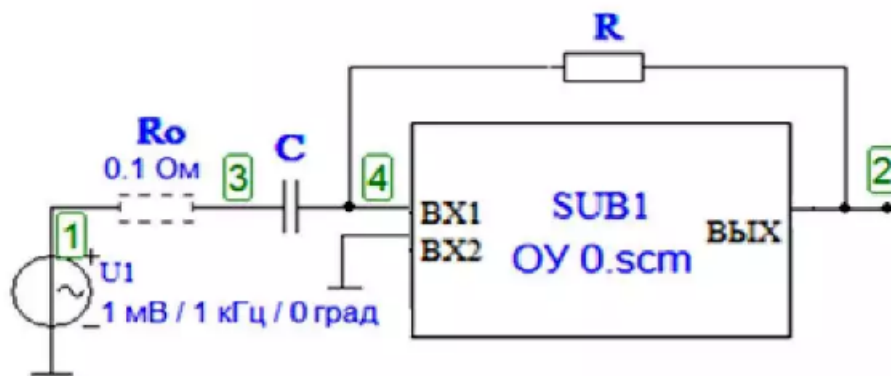


Рис. 19: Схема дифференциатора.

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.

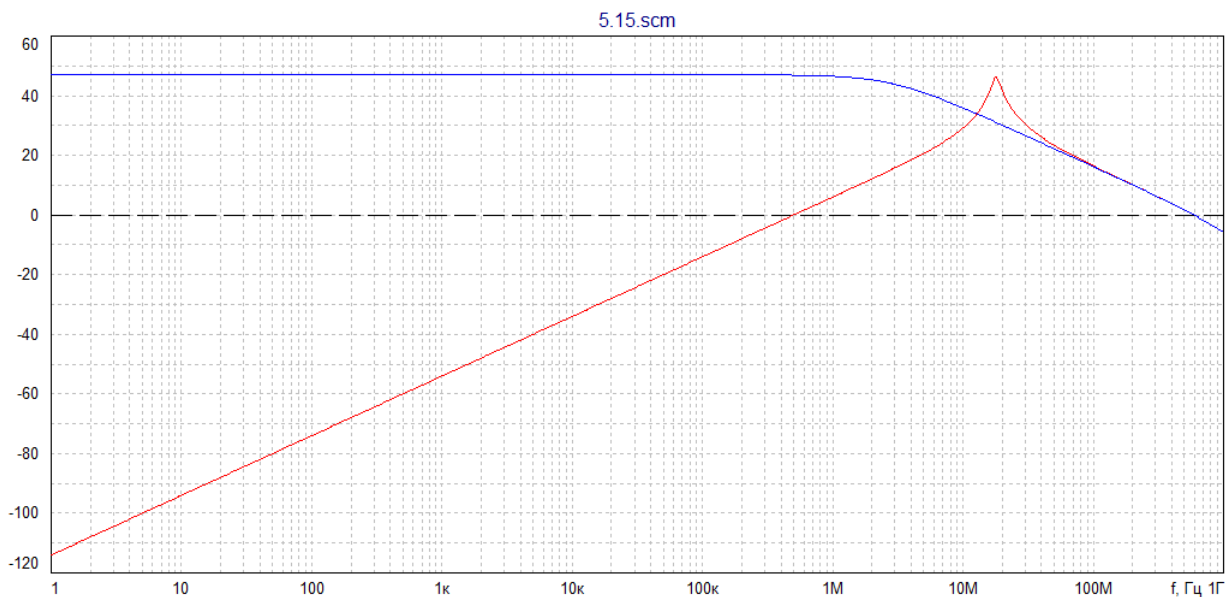


Рис. 20: График АЧХ дифференциатора (красная линия) и АЧХ ОУ без ОС (синяя линия).

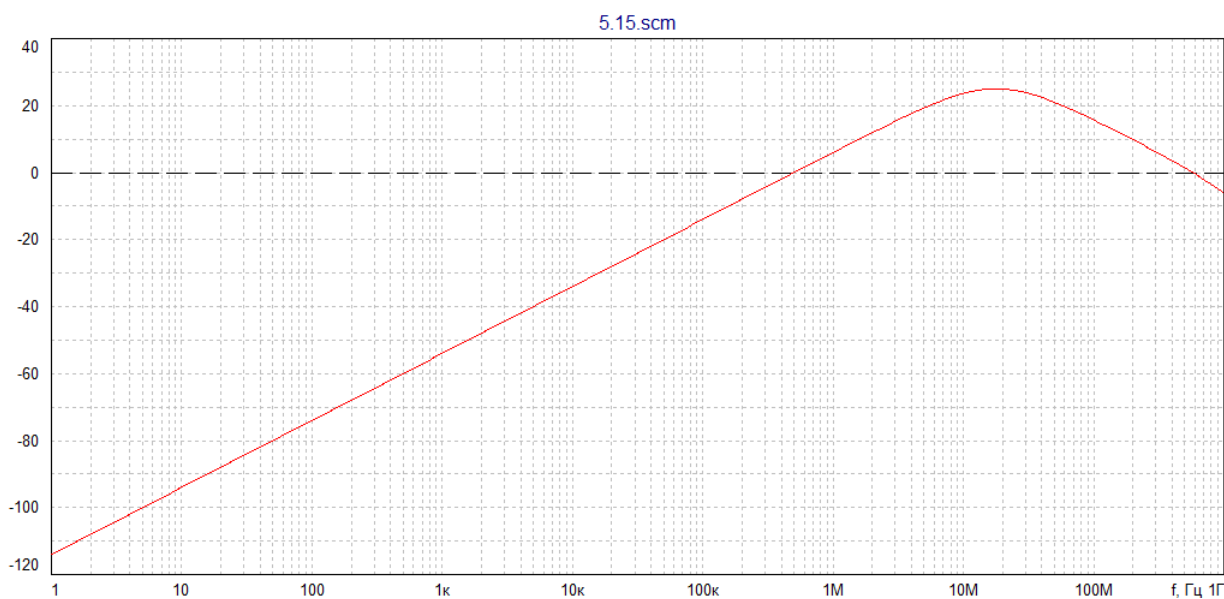


Рис. 21: График АЧХ дифференциатора при $R_0 = 240$ Ом – сопротивлении, при котором подъем на АЧХ перестает иметь место.

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.

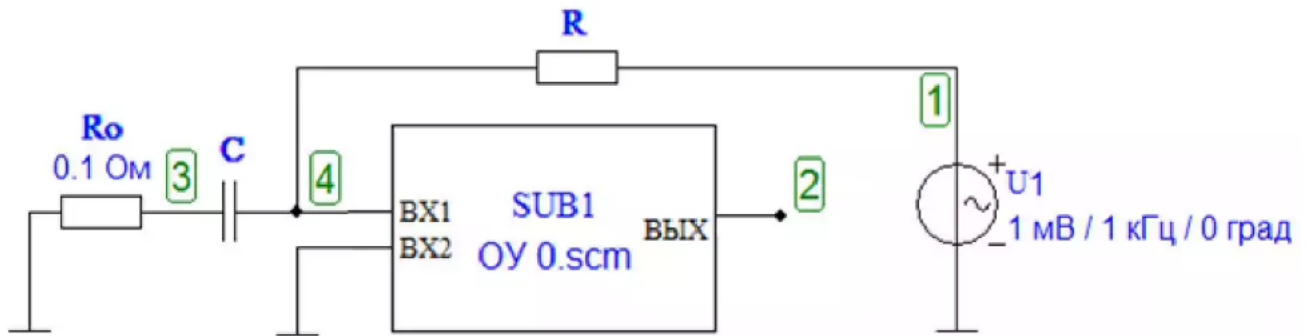


Рис. 22: Схема дифференциатора с разомкнутой петлей ОС.

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.

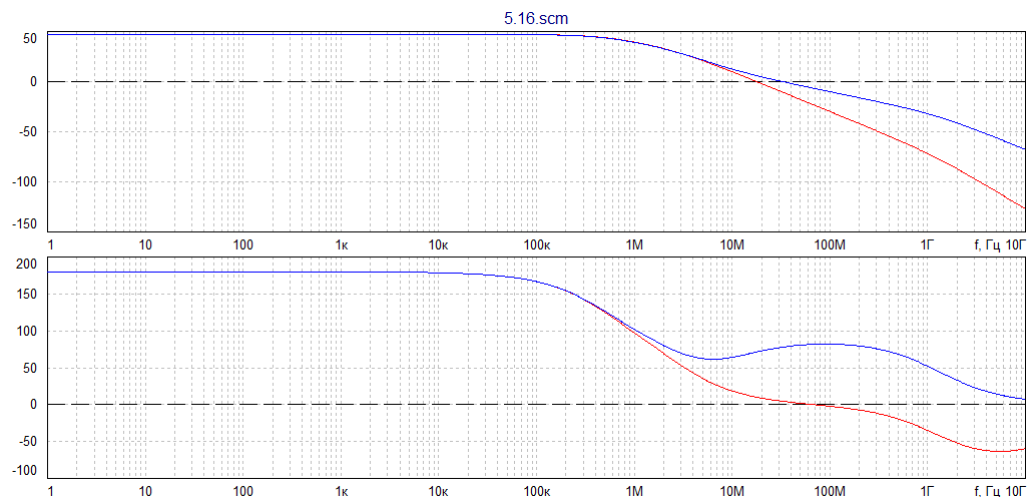


Рис. 23: График АЧХ петлевого усиления дифференциатора Красная линия – $R_0=0.1\text{Ом}$, синяя линия - $R_0=240\text{Ом}$.

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.

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 $t_{\text{и}} = 1/f$ для интегратора и для дифференциатора $t_{\text{и}} = 500$ мкс.

Задание 11.

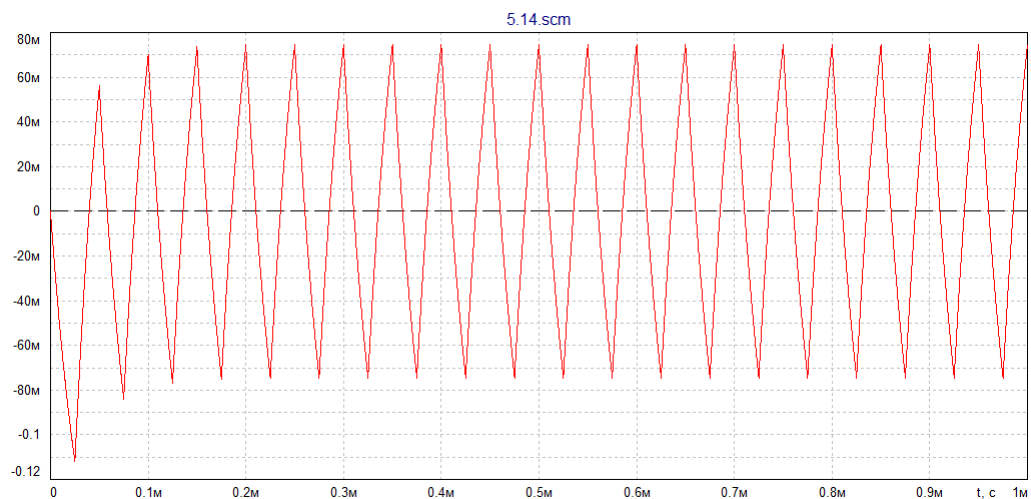


Рис. 25: График линейного закона интегрирования.

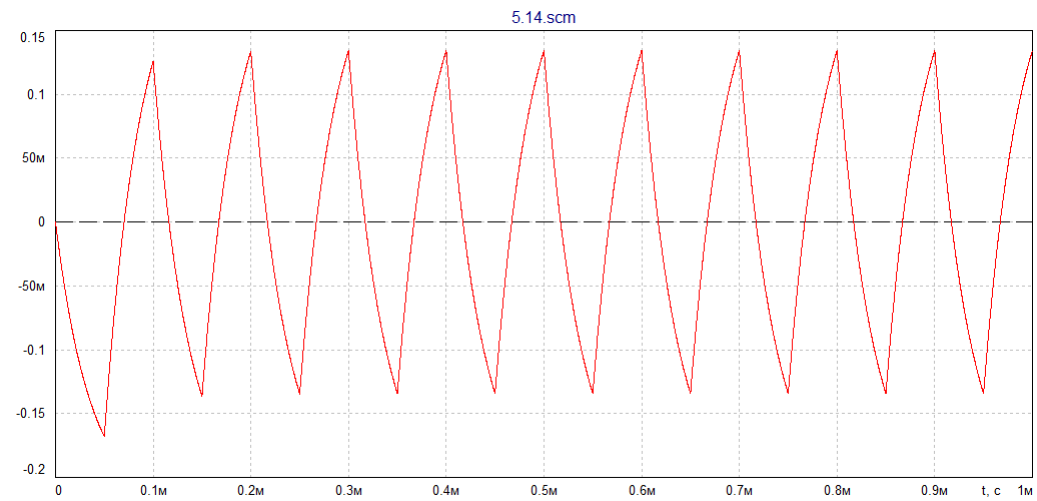


Рис. 26: График экспоненциального закона интегрирования.

$t_{\text{имакс}} = 500 \text{ мкс}$

Вывод по заданию:

- При значении длительности входного импульса равном 670мкс, линейный закон интегрирования переходит в экспоненциальный.

Задание 12.

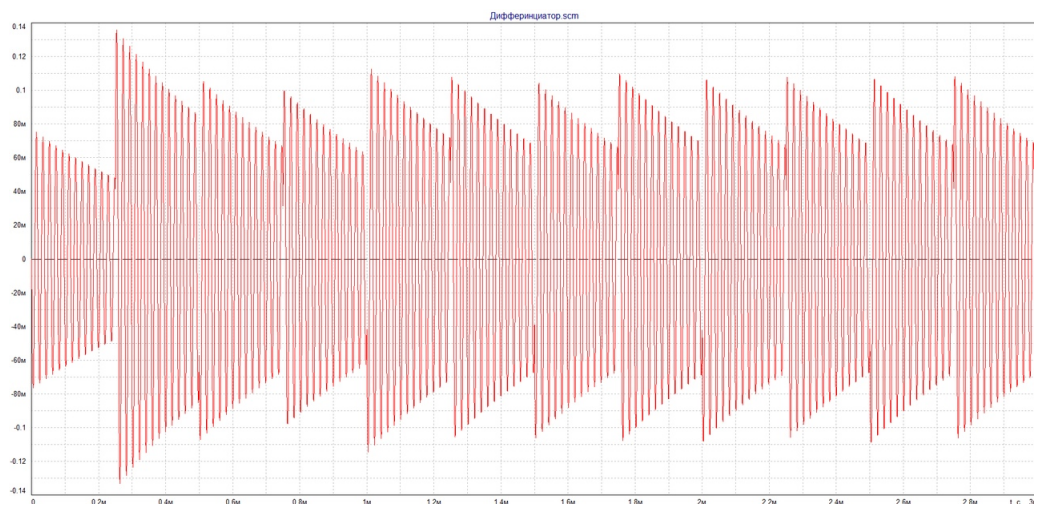


Рис. 27: График ПХ при $R_0 = 0.1 \text{ Ом}$, запас устойчивости по фазе равен 10 градусов.

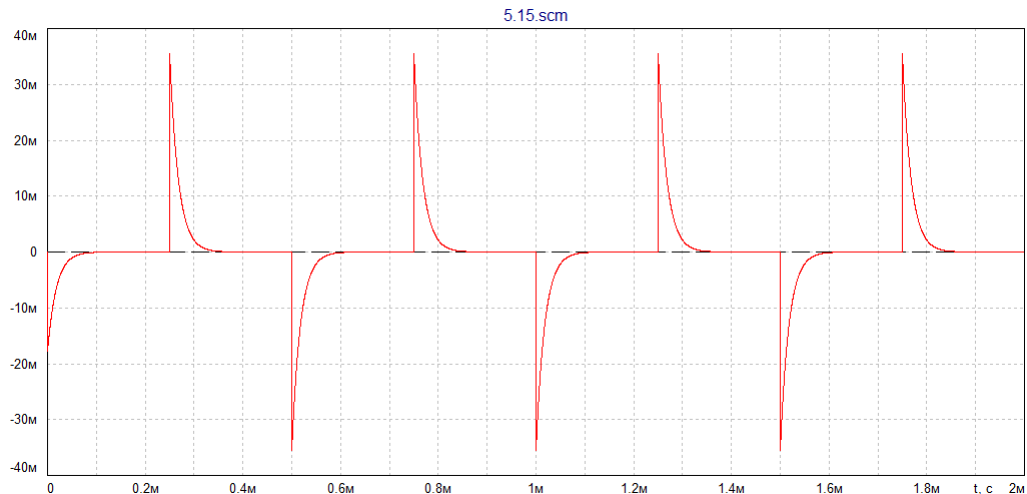


Рис.28: График ПХ при $R_0 = 240$ Ом, запас устойчивости по фазе 78 градусов.

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.