

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского

Д.Н. Ивлев
Д.В. Савельев

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета для студентов ННГУ, обучающихся по специальностям 11.05.02 «Специальные радиотехнические системы», 10.05.02 «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», 10.05.07 «Противодействие техническим разведкам»

Нижний Новгород
2023

УДК 621.383.8(076.5)
ББК 32.971.31-041я7-5
И25

И25 Ивлев Д.Н., Савельев Д.В. ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ:
Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2023. –
29 с.

Рецензент: доктор физ.-мат. наук, доцент А.В. Ключев

В пособии кратко описаны основные особенности и схемы включения операционных усилителей, позволяющие реализовать различные функциональные узлы электронной техники. Приведено описание лабораторной работы и указания к её выполнению.

Практикум предназначен для студентов радиофизического факультета ННГУ в качестве пособия при подготовке и проведении лабораторных работ по курсам «Схемотехника аналоговых электронных устройств», «Электроника и схемотехника».

Работа выполнена в рамках образовательного проекта Передовой инженерной школы ННГУ им. Н.И. Лобачевского.

Ответственный за выпуск:
зам. председателя методической комиссии радиофизического
факультета ННГУ,
д.ф.-м.н., профессор **Е.З. Грибова**

УДК 621.383.8(076.5)
ББК 32.971.31-041я7-5
© Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2023
© Ивлев Д.Н., Савельев Д.В., 2023

Введение

Операционный усилитель (ОУ) – это интегральный дифференциальный усилитель, основным элементом которого является дифференциальный каскад [1-4]. Интегральная (в виде интегральной микросхемы) реализация ОУ сделала его универсальным средством схемотехники. С помощью подсхем обратной связи (ОС), внешних по отношению к ОУ, достигается та или иная функциональность устройства на базе ОУ. При этом ОУ можно представить макромоделями (в виде идеального или квазиидеального ОУ).

1. Принцип построения ОУ

На рисунке 1 представлен один из возможных вариантов принципиальной схемы ОУ.

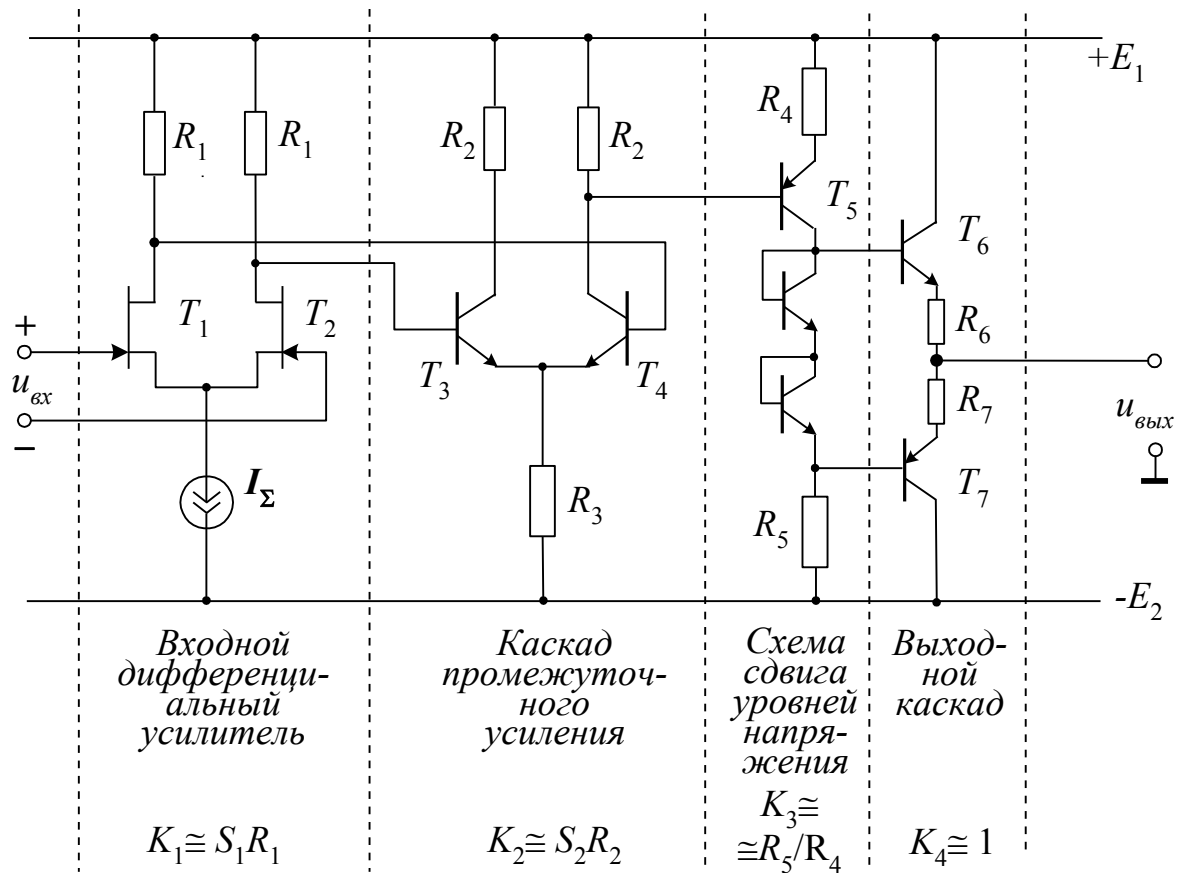


Рис. 1. Принципиальная схема операционного усилителя

Поскольку интегральный дифференциальный усилитель (ИДУ) является усилителем напряжения, то при подключении к нему источника сигнала требуется выполнение условия согласования по напряжению. Это легко сделать, если первый каскад обладает большим входным сопротивлением $R_{вх}$. Одним из путей повышения $R_{вх}$ является использование полевых транзисторов. Поэтому в усилителе на рис. 1 первый каскад выполнен на полевых транзисторах с управляющим $p-n$ переходом (транзисторы T_1 и T_2).

Кроме того, на первый каскад возлагается задача подавления синфазной составляющей входного сигнала. Коэффициент передачи синфазной составляющей $K_{синф}$ зависит от соотношения сопротивлений стоковой нагрузки R_1 и сопротивления в цепи истоков [1]. Последнее есть сопротивление источника тока I_Σ , который, обладая большим внутренним сопротивлением, обеспечивает глубокую отрицательную обратную связь по синфазной составляющей, уменьшая тем самым коэффициент передачи $K_{синф}$.

Следующий за входным усилителем каскад промежуточного усиления также является дифференциальным, но с пониженными требованиями к его

характеристикам. Каскад промежуточного усиления выполнен на биполярных транзисторах T_3 и T_4 и имеет однополярный выход, соединённый с базой транзистора T_5 выходной ступени. В цепи эмиттеров вместо источника тока использован обычный резистор R_3 .

Выходная ступень составлена из схемы смещения уровней напряжения на транзисторе T_5 и выходного двухтактного усилителя на транзисторах T_6 и T_7 . Для создания необходимого напряжения смещения на базах T_3 и T_4 вместо диодов использованы транзисторы в диодном включении. В выходной цепи окончательного каскада поставлены резисторы R_6 и R_7 , которые выполняют защитную функцию, предотвращая последствия возможного короткого замыкания на выходе усилителя при подключении внешней нагрузки.

Коэффициент усиления по напряжению интегрального дифференциального усилителя равен произведению коэффициентов передачи входящих в него каскадов:

$$K = K_1 K_2 K_3 K_4, \quad (1)$$

где $K_1 \approx S_1 R_1$, $K_2 \approx S_2 R_2$, $K_3 \approx R_5 / R_4$ и $K_4 \approx 1$ – модули коэффициентов передачи всех четырёх ступеней усилителя; S_1 и S_2 – соответственно крутизна транзисторов T_1 и T_2 , T_3 и T_4 . Таким образом достигается значительное усиление. Реально достижимые значения K исчисляются десятками тысяч.

Большие значения K из-за не учтённой в структуре на рис. 1 «паразитной» обратной связи между контактами микросхемы при наличии навесного монтажа, а также связи между элементами внутри интегральной схемы приводят к неустойчивой работе и к самовозбуждению ИДУ. Поэтому на практике интегральные дифференциальные усилители применяются только в схемах, где имеется отрицательная обратная связь. Такую обратную связь можно осуществлять, используя различные внешние по отношению к усилителю элементы (например, внешние резисторы и ёмкости), благодаря чему усилитель, охваченный отрицательной обратной связью, может выполнять не только операцию усиления, но и другие операции с аналоговыми сигналами. Отсюда происходит второе наиболее часто используемое в технической литературе название интегрального дифференциального усилителя – *операционный усилитель*.

На рис. 2 представлены варианты схемных обозначений ИДУ (ОУ). Неинвертирующие входы обозначаются знаком «+», а инвертирующие – либо знаком «-», либо знаком инверсии «○» (рис. 2а).

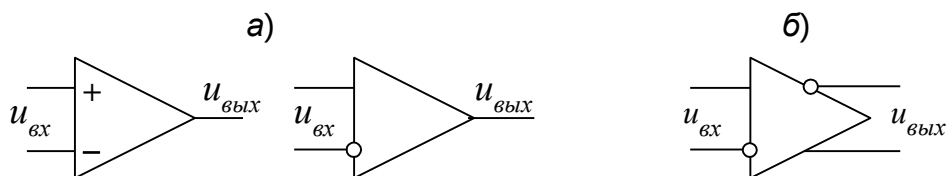


Рис. 2. Схемные обозначения ОУ с однополярным (а) и дифференциальным (б) выходами

Усилители могут иметь как однополярный (рис. 2а), так дифференциальный (рис. 2б) выходы. В последнем случае для обозначения

дифференциального входа и дифференциального выхода используются знаки инверсии.

Представленная на рис. 1 схема усилителя поясняет принцип построения интегральных дифференциальных (операционных) усилителей. При изготовлении интегральных схем могут быть использованы отличающиеся от описанных в данном разделе технические решения. Связано это со стремлением получить значительное усиление при наименьшем числе схемных элементов, малых величинах напряжения питания и минимальных затратах мощности источников питания.

2. Основные способы включения операционных усилителей

Существуют два основных включения ОУ: неинвертирующее и инвертирующее.

Инвертирующее включение ОУ показано на рис. 3.

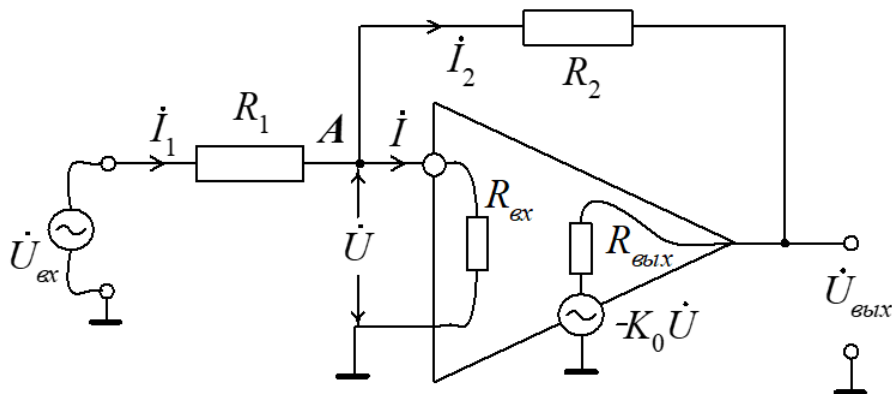


Рис. 3. Макромодель ОУ при инвертирующем включении

Операционный усилитель без обратной связи характеризуется внутренними параметрами: коэффициентом передачи $K_0(j\omega)$, входным сопротивлением R_{ex} , входной ёмкостью C_{ex} и выходным сопротивлением R_{6lx} . Полагаем, что в рабочем диапазоне частот собственный коэффициент передачи ОУ не зависит от частоты $K_0(j\omega)$, а его входная ёмкость мала настолько, что модуль её импеданса $1/\omega C_{ex} \gg R_{ex}$. При инвертирующем включении

$$K_0(j\omega) = -K_0 = const \quad (K_0 = |K_0(j\omega)|). \quad (2)$$

Входное напряжение

$$\dot{U}_{ex} = \dot{I}_1 R_1 + \dot{U}, \quad (3)$$

где сопротивление R_1 включает в себя внутреннее сопротивление источника входного сигнала $\dot{U}_{ex}$. Входной ток

$$\dot{I}_1 = \dot{I} + \dot{I}_2 \quad (4)$$

образован входным током ОУ

$$\dot{I} = \dot{U} / R_{ex} \quad (5)$$

и током

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U} - \dot{U}_{6lx}}{R_2} \quad (6)$$

через сопротивление R_2 в цепи ОС. После подстановки (4)-(6) в (3) и с учётом того, что при инвертирующем включении $\dot{U}_{6lx} = -K_0 \dot{U}$, получаем

$$\dot{U}_{ex} = \frac{R_1}{R_{ex}} \dot{U} + \frac{(1 + K_0)R_1}{R_2} \dot{U} + \dot{U}. \quad (7)$$

В предположении, что ОУ является идеальным, т.е. при

$$R_{ex} \rightarrow \infty, R_{вых} \rightarrow 0 \text{ и } K_0 \rightarrow \infty,$$

из (7) получаем выражение для коэффициента усиления

$$K = \frac{\dot{U}_{вых}}{\dot{U}_{ex}} \approx -\frac{R_2}{R_1}, \quad (8)$$

из которого следует, что усилительные свойства ОУ полностью определяются параметрами отрицательной ОС – отношением сопротивлений R_2 и R_1 .

В силу того, что K_0 является большой величиной ($K_0 \rightarrow \infty$), а напряжение на выходе $\dot{U}_{вых}$ всегда конечно, потенциал инвертирующего входа ОУ (потенциал точки А) близок к нулю, точнее $|\dot{U}| \ll \{|\dot{U}_{ex}|, |\dot{U}_{вых}|\}$. Это позволяет считать точку А «виртуальной землёй» с потенциалом $\dot{U} \approx 0$.

В дальнейшем при рассмотрении основных включений ОУ будем исходить из предположения квазиидеальности операционного усилителя, согласно которому разность потенциалов на инвертирующем и неинвертирующем входах близка к нулю, и это предположение выполняется тем точнее, чем выше коэффициент усиления K_0 усилителя без обратной связи.

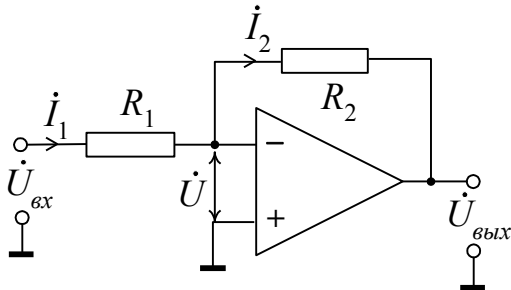


Рис. 4. Упрощённая модель инвертирующего усилителя

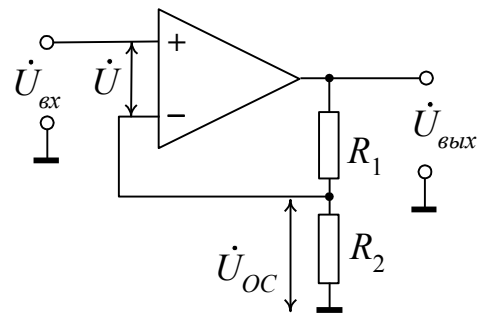


Рис. 5. Неинвертирующее включение ОУ

Следуя этому предположению, выражение (8) можно получить более простым способом. При $R_{ex} \rightarrow \infty$ и $K_0 \rightarrow \infty$ $\dot{I}_1 \approx \dot{I}_2$ и $\dot{U} \approx 0$. Следовательно (см. рис. 4),

$$\dot{U}_{ex} \approx \dot{I}_1 R_1, \text{ а } \dot{U}_{вых} \approx -\dot{I}_2 R_1, \quad (9)$$

что сразу даёт выражение (7) для коэффициента усиления.

Неинвертирующее включение ОУ показано на рис. 5. Для идеального ОУ, у которого $R_{ex} \rightarrow \infty$, $R_{вых} \rightarrow 0$ и $K_0 \rightarrow \infty$, $\dot{U} \approx 0$ и

$$\dot{U}_{\text{ex}} \approx \dot{U}_{\text{OC}} = \dot{U}_{\text{блх}} \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (10)$$

Следовательно,

$$K = \frac{\dot{U}_{\text{блх}}}{\dot{U}_{\text{ex}}} \approx 1 + \frac{R_1}{R_2}. \quad (11)$$

Частным случаем неинвертирующего включения ОУ является включение по схеме *повторителя напряжения* (рис. 6).

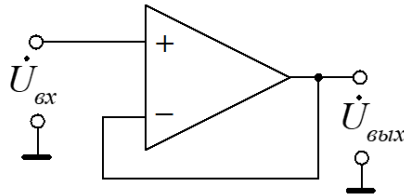


Рис. 6. Повторитель напряжения

Такое включение получается в пределе $R_1 \rightarrow 0$, $R_2 \rightarrow \infty$ (R_2 отсутствует). При этом, как это следует из (11) коэффициент передачи $K \rightarrow 1$.

3. Варианты применения операционных усилителей

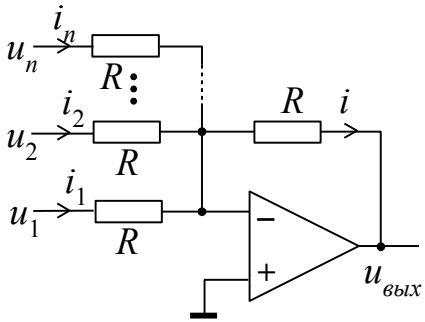
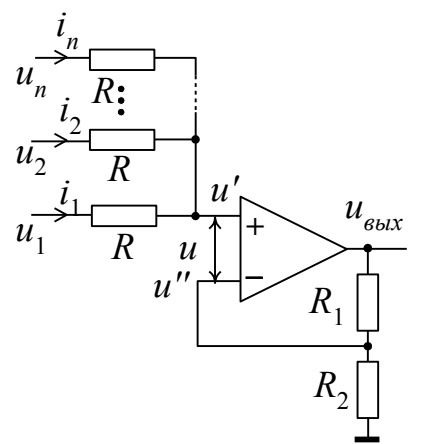
Возможности ОУ как основы аналоговой схемотехники определяются многообразием вариантов его использования в аналоговой аппаратуре в цепях с отрицательной обратной связью (ООС). Ниже приводятся примеры включения ОУ в безынерционные и инерционные линейные цепи.

В безынерционных цепях нет зависимости выполняемых операций от частоты. Поэтому при описании поведения ОУ с различными вариантами ООС комплексные амплитуды токов и напряжений можно заменить их мгновенными значениями. Однако необходимо помнить, что это возможно лишь тогда, когда полоса пропускания ОУ Π не ниже ширины спектра $\Delta\omega$ подаваемых на вход ОУ воздействий.

Примеры безынерционных цепей на основе ОУ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Включение ОУ в безынерционные линейные цепи

Назначение цепи	Производимая операция	Цепь
Вычитающий усилитель	$i_1 \approx i, \frac{u_1 - u''}{R} \approx \frac{u'' - u_{\text{вых}}}{kR},$ $ku_1 - u''(k+1) \approx -u_{\text{вых}},$ $u'' \approx u' = u_2 \frac{k}{k+1}, \quad u_{\text{вых}} \approx k(u_2 - u_1)$	
Преобразователь ток-напряжение	$i + i_1 \approx 0 \quad (R_{\text{ex}} \rightarrow \infty),$ $i \approx -i_1 = -\frac{u_{\text{вых}}}{R} \quad (\text{т.к. } u \approx 0)$	
Прецизионный аттенюатор	$u \approx 0, \text{ поэтому}$ $u_{\text{вых}} \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{\text{ex}}$	

Сумматор инвертирующий	$\frac{u_1}{R} + \frac{u_2}{R} + \dots + \frac{u_n}{R} \approx -\frac{u_{\text{вых}}}{R}$ (т.к. $u \approx 0$), $u_{\text{вых}} \approx -(u_1 + u_2 + \dots + u_n)$	
Сумматор неинвертирующий	$\frac{u_1 - u'}{R} + \frac{u_2 - u'}{R} + \dots + \frac{u_n - u'}{R} \approx 0,$ $u_1 + u_2 + \dots + u_n \approx nu',$ $u' \approx u'' = u_{\text{вых}} \frac{R_2}{R_1 + R_2},$ $u_{\text{вых}} \approx K(u_1 + u_2 + \dots + u_n),$ $K = \frac{1 + R_1 / R_2}{n}$	

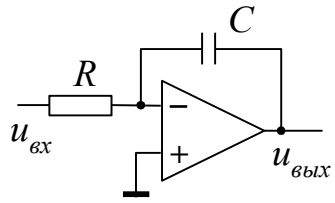
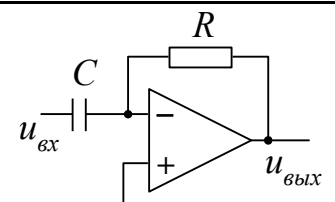
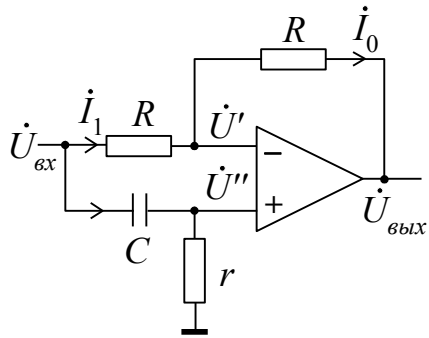
Инерционные линейные цепи на операционных усилителях строятся с применением подсхем, включающих реактивные элементы (преимущественно ёмкости), благодаря чему становятся возможными операции фильтровой обработки. Инерционные линейные цепи относятся к классу активных *RC*-цепей, т.е. цепей, включающих ОУ (как активные элементы), резисторы и ёмкости (в цепях передачи сигналов и в цепях обратной связи).

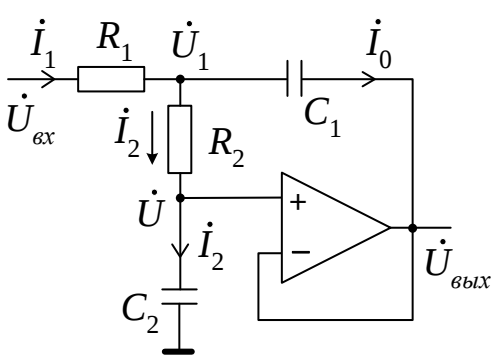
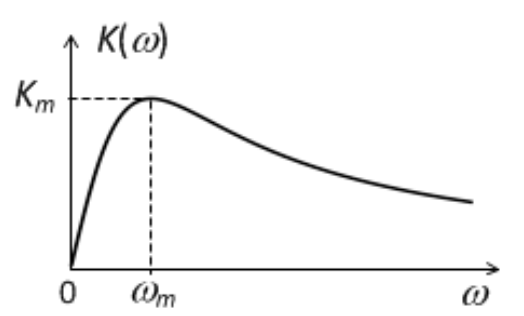
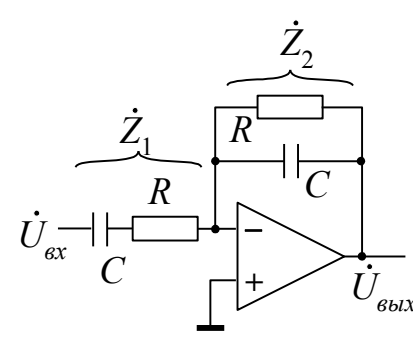
Достоинством активных *RC*-цепей является возможность интегрирования в микросхемы устройств, работа которых связана с фильтровой обработкой сигналов. Функции, которые выполняют активные *RC*-фильтры подобны функциям *LCR*-фильтров. Однако индуктивности в составе последних имеют достаточно большие размеры, и тем больше, чем ниже частоты, на которых они применяются. Это препятствует интегрированию индуктивностей в микросхемы, особенно в те микросхемы, которые работают на относительно низких частотах. Индуктивности в интегральном исполнении используются только в СВЧ и микроволновом диапазонах длин волн. Но даже в микроволновом диапазоне интегральные индуктивности имеют размеры, значительно превышающие размеры других элементов (транзисторов, резисторов, ёмкостей и т.д.), что является препятствием на пути к повышению уровня интеграции микросхем. В то же время применение активных *RC*-цепей, допускающих интегральное исполнение, позволяет создавать многофункциональные системы на кристалле. Но при этом необходимо строгое соблюдение правил, приводимых для каждого конкретного ОУ в руководствах по их применению. В частности, не нужно забывать, что активным элементам, каковыми является ОУ, свойственны

нелинейные искажения, которые могут качественно изменить работу активной RC-цепи, если подаваемый на неё сигнал по уровню выходит за пределы допустимого динамического диапазона.

Примеры инерционных цепей на основе ОУ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Включение ОУ в инерционные линейные цепи

Назначение цепи	Производимая операция	Цепь
Аналоговый интегратор	$\frac{\dot{U}_{\text{ex}}}{R} \approx -j\omega C \dot{U}_{\text{vblx}},$ $\dot{U}_{\text{vblx}} \approx -\frac{\dot{U}_{\text{ex}}}{j\omega RC},$ $u_{\text{vblx}}(t) \approx -\frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{ex}}(t) dt$	
Дифференциатор	$\dot{U}_{\text{ex}} j\omega C \approx -\frac{\dot{U}_{\text{vblx}}}{R},$ $\dot{U}_{\text{vblx}} \approx -j\omega RC \dot{U}_{\text{ex}}$	
Фазовращатель	$\frac{\dot{U}_{\text{ex}} - \dot{U}'}{R} \approx \frac{\dot{U}' - \dot{U}_{\text{vblx}}}{R},$ $\dot{U}_{\text{vblx}} \approx 2\dot{U}' - \dot{U}_{\text{ex}},$ но $\dot{U}' \approx \dot{U}'' = \dot{U}_{\text{ex}} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC},$ поэтому $K(j\omega) = K e^{j\varphi(\omega)} = \frac{\dot{U}_{\text{vblx}}}{\dot{U}_{\text{ex}}} \approx -\frac{1 - j\omega RC}{1 + j\omega RC}$ и АЧХ ($K(\omega) = K(j\omega)$) от частоты не зависит, а ФЧХ $\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}[K(j\omega)]}{\text{Re}[K(j\omega)]}$ определяется выражением $\varphi \approx \pi - 2\arctg(\omega RC)$	

Активный RC-фильтр нижних частот (ФНЧ)	$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_0,$ $\frac{\dot{U}_{\text{ex}} - \dot{U}_1}{R_1} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}}{R_2} + \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_{\text{вых}}}{1/j\omega C_1},$ но $\frac{\dot{U}_1 - \dot{U}}{R_2} \approx \dot{U} \cdot j\omega C_2$, т.к. $R_{\text{ex}} \rightarrow \infty$; $\dot{U} \approx \dot{U}_{\text{вых}}$, т.к. $K_0 \rightarrow \infty$ и ОУ включён по схеме повторителя напряжения. В результате, заменяя $j\omega$ на p, получаем $K(p) = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{ex}}} \approx$ $\approx \frac{1}{p^2 + p \frac{C_2(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 C_1 C_2} + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}},$ что является передаточной функцией ФНЧ 2-го порядка	
Активный полосовой RC-фильтр	$K \approx -\frac{\dot{Z}_2}{\dot{Z}_1} = -\frac{1}{\left(j\omega C + \frac{1}{R}\right)\left(R + \frac{1}{j\omega C}\right)},$ или (после замены $j\omega$ на p) $K(p) \approx -\frac{p\tau}{(1 + p\tau)^2}, \text{ где } \tau = RC.$ АЧХ фильтра $K(\omega) = K(j\omega)$ имеет максимум на частоте $\omega_m = 1/\tau$, что характеризует активный RC-фильтр как полосовой 	

Соединяя под схему пассивной RC -цепи с операционным усилителем, мы получаем много дополнительных возможностей, таких как синтез заданных значений амплитудно-фазовых характеристик, полосы пропускания.

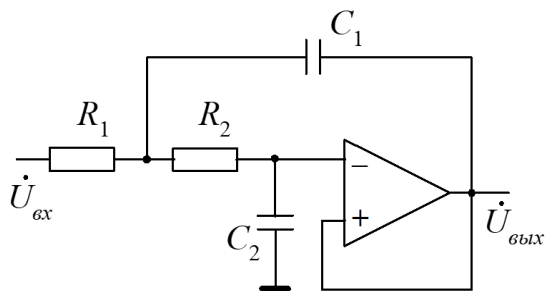


Рис. 7. Универсальная прототипная структура активного RC -фильтра

На рис. 7 показан вариант прототипной структуры фильтра нижних частот (ФНЧ), свойства которой зависят от соотношения сопротивлений R_1 , R_2 и ёмкостей C_1 , C_2 . Меняя местами сопротивления и ёмкости, например, так, как показано на рис. 8, можно низкочастотную структуру преобразовать в высокочастотную (ВЧ) структуру.

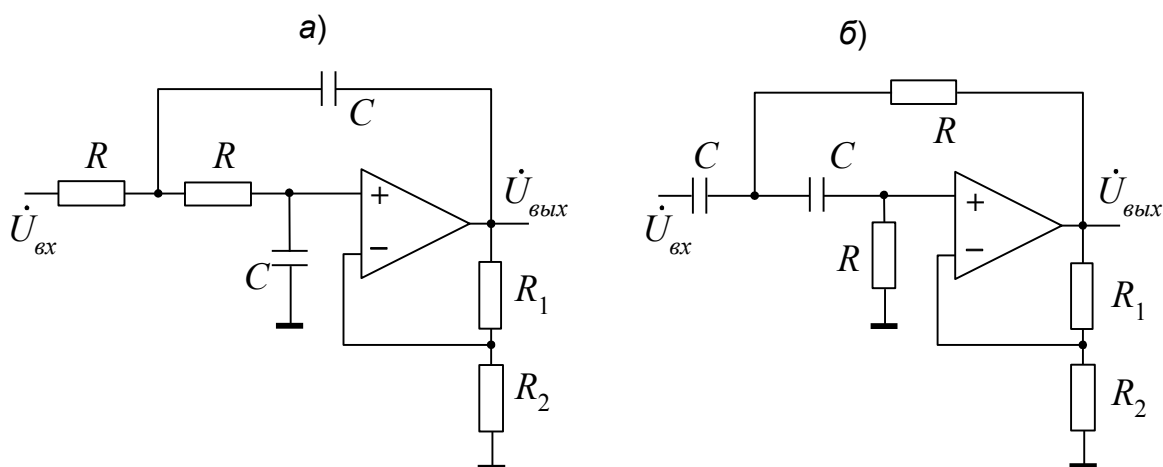


Рис. 8. Активные RC -фильтры нижних (а) и верхних (б) частот

Однако при построении ВЧ-структур повышаются требования к полосе пропускания ОУ и устойчивости его работы. В связи с этим налагаются ограничения на частотный диапазон входных сигналов. Такие же ограничения действуют и в отношении представленного в табл. 2 дифференцирующего усилителя.

4. Описание лабораторной установки

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

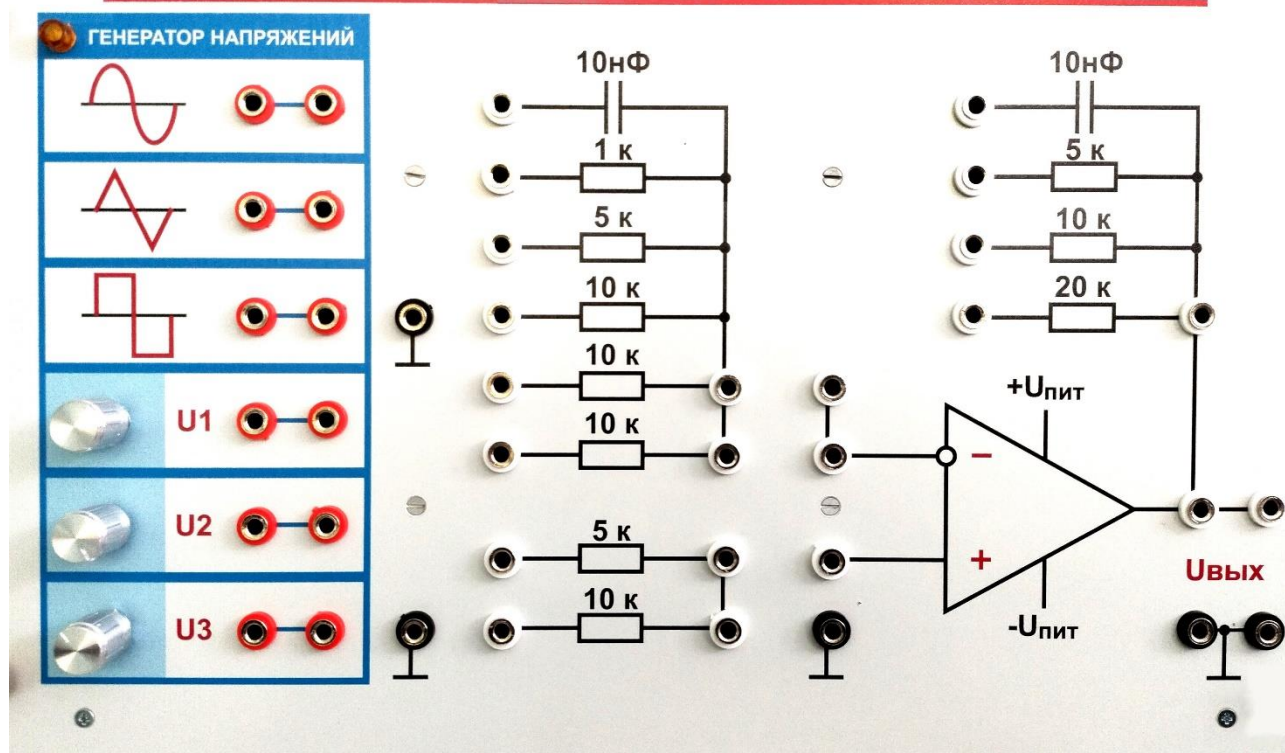


Рис. 9. Внешний вид передней панели лабораторной установки

Внешний вид передней панели лабораторной установки с изображённой схемой представлен на рис. 9. На данной панели имеются гнёзда для подключения к ОУ внешних элементов (резисторы и конденсаторы различных номиналов), а также генераторы трёх переменных (синусоидального, пилообразного, прямоугольного) и трёх постоянных (U_1 , U_2 , U_3) напряжений. Каждый генератор имеет два замкнутых между собой гнезда красного цвета для подключения к его выходу, за счёт чего сигнал генератора можно подключить к одной или двум нагрузкам (например, одновременно к осциллографу и к входу схемы на ОУ). Амплитуда и частота переменных напряжений постоянны и не регулируются. Значение постоянного напряжения на выходе каждого источника плавно регулируется ручкой, расположенной слева от гнезд подключения. Гнезда чёрного цвета предназначены для соединения с нулём источника питания лабораторной установки. Ноль источника питания для операционного усилителя и для генераторов напряжений является общим, поэтому для соединения источника напряжения со входом схемы на ОУ используется только один проводник, соединяющий красное гнездо источника с одним из белых гнезд на схеме. Для подачи сигнала с генератора или какой-либо точки схемы установки на осциллограф или другую панель лабораторной установки необходимо использовать два проводника, при этом чёрный проводник кабеля, идущего к

осциллографу, необходимо подключить к одному из гнезд чёрного цвета, а красный – к гнезду красного или белого цвета.

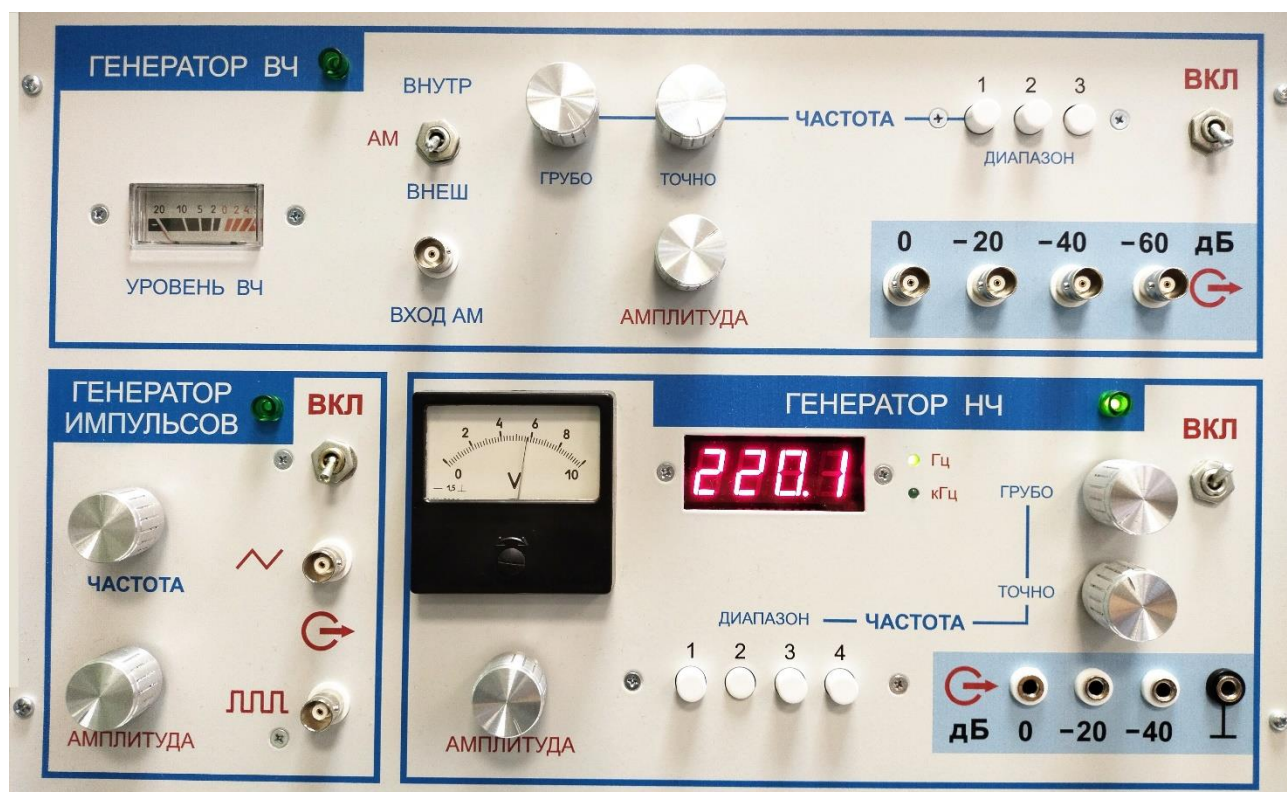


Рис. 10. Вид панели лабораторной установки с генераторами сигналов

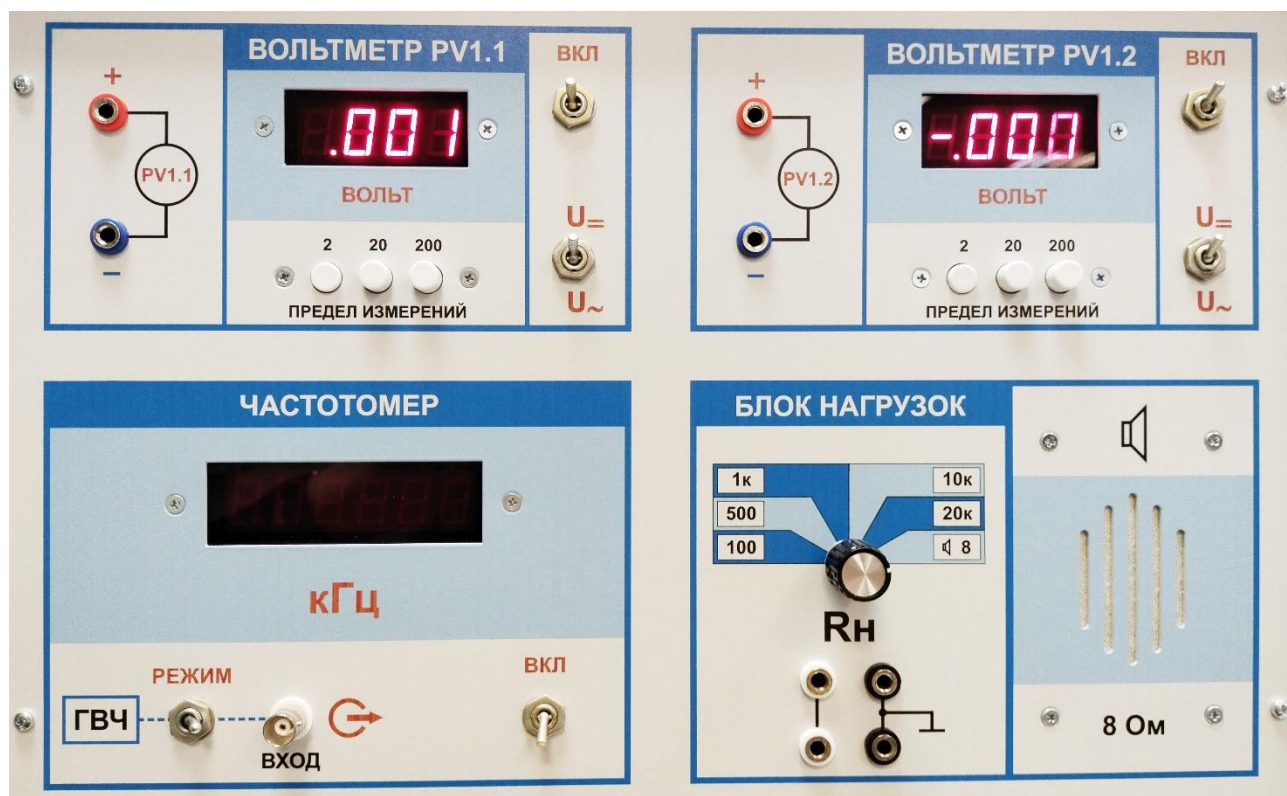


Рис. 11. Вид панели лабораторной установки с вольтметрами

На рис. 10-11 показан вид дополнительных панелей установки, необходимых для генерации сигнала и измерения напряжений в некоторых заданиях. На показанных дополнительных панелях будут задействованы генератор НЧ (низких частот) и вольтметры PV1.1 и PV1.2.

На панели генератора НЧ (рис. 10) расположены следующие органы управления:

- тумблер «ВКЛ» для включения питания генератора НЧ;
- ручка «Амплитуда» для плавной регулировки амплитуды выходного сигнала;
- четыре кнопки выбора диапазона частот;
- две ручки («Грубо» и «Точно») плавной регулировки частоты сигнала внутри выбранного диапазона.

Три гнезда выходного сигнала (белого цвета) различаются уровнем ослабления сигнала: «0 дБ» – без ослабления, «-20 дБ» – с ослаблением 20 дБ, «-40 дБ» – с ослаблением 40 дБ. Гнездо чёрного цвета служит для подключения общего провода. На цифровой панели отображается частота генерируемого сигнала.

Вольтметры «PV1.1» и «PV1.2» измеряют постоянное значение напряжения (тумблер режима измерений в положении «U₌»), либо действующее значение переменного напряжения (тумблер режима измерений в положении «U_~»). Числа над кнопками выбора предела измерений означают максимальное значение измеряемого напряжения в вольтах. Для повышения точности измерений необходимо выбирать минимально возможное значение предела измерений. Вольтметры включаются тумблерами с надписью «ВКЛ».

Для наблюдений за формой сигналов и измерения их параметров в установке также используется двухканальный осциллограф. При измерении амплитуды сигналов с помощью осциллографа для повышения точности измерений необходимо, чтобы осциллограмма сигнала на экране осциллографа была чётко видна, не выходила за верхнюю и нижнюю границы экрана и её размах составлял не менее 2 клеток по вертикальной шкале.

5. Задания и порядок выполнения работы

5.1. Исследование неинвертирующего усилителя

Соберите схему для исследования, приведённую на рисунке 12 с начальными значениями $R1 = R2 = 5 \text{ кОм}$. Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ на схему подать с любого из трёх генераторов напряжений, расположенных в левом верхнем углу на той же панели, что и схема с ОУ. Это напряжение подать также и на первый вход осциллографа, а второй вход осциллографа подключить к выходу схемы усилителя.

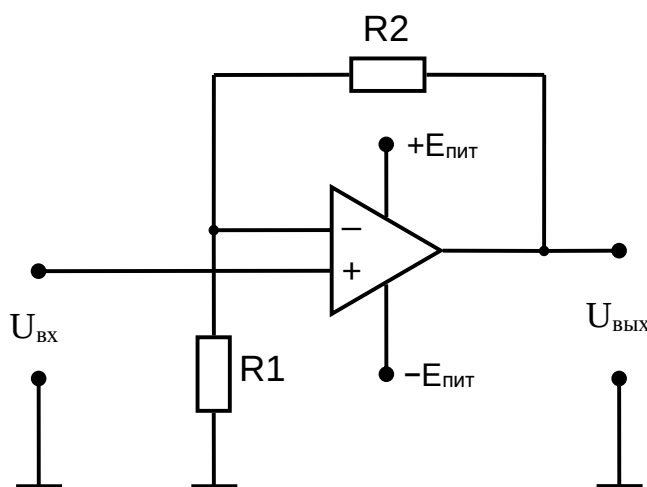


Рис. 12. Схема для исследования неинвертирующего усилителя

Порядок выполнения задания:

- с помощью осциллографа измерить и записать амплитуду и частоту подаваемого на вход схемы напряжения;
- произвести измерения амплитуды выходного напряжения схемы, меняя значения резисторов $R1$ и $R2$ в соответствии с таблицей из протокола измерений;
- наблюдая осциллограммы, сравнить фазы входного и выходного сигналов, сохранить (записать на флэш-накопитель*, сфотографировать или зарисовать) осциллограммы входного и выходного сигналов с экрана осциллографа для последующей вставки в отчёт;
- вычислить теоретические ($K_{\text{ус теор}}$) и экспериментальные ($K_{\text{ус экспер}}$) значения коэффициента усиления неинвертирующего усилителя в приведённой таблице;
- записать в отчёт объяснение всех полученных при выполнении задания результатов.

* Осциллограф работает только с накопителями с файловой системой FAT32

Протокол выполнения задания

Амплитуда входного напряжения $U_{вх} =$

Частота входного напряжения $F_{вх} =$

Таблица коэффициента усиления

R1, кОм	R2, кОм	$K_{ус}$ теор	$U_{вых}$, В	$K_{ус}$ exper
5	5			
1	10			
∞	0			

5.2. Исследование инвертирующего усилителя

Собрать схему для исследования, приведённую на рисунке 13, с начальными значениями $R1 = R2 = 5$ кОм.

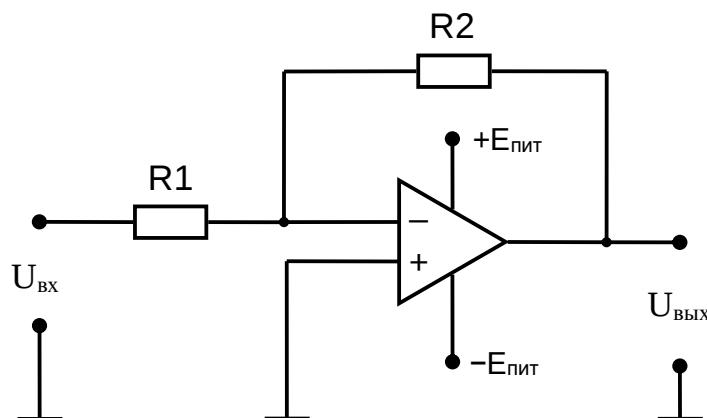


Рис. 13. Схема для исследования инвертирующего усилителя

Далее всё делается аналогично заданию 1. Входное напряжение $U_{вх}$ на схему подать с любого из трёх генераторов напряжений, расположенных в левом верхнем углу на той же панели, что и схема с ОУ. Это напряжение подать также и на первый вход осциллографа, а второй вход осциллографа подключить к выходу схемы усилителя.

Порядок выполнения задания:

- с помощью осциллографа измерить и записать амплитуду и частоту подаваемого на вход схемы напряжения;
- произвести измерения амплитуды выходного напряжения схемы, меняя значения резисторов $R1$ и $R2$, в соответствии с таблицей из протокола измерений;
- наблюдая осциллограммы, сравнить фазы входного и выходного сигналов, сохранить (записать на флэш-накопитель, сфотографировать или зарисовать) осциллограммы входного и выходного сигналов с экрана осциллографа для последующей вставки в отчёт;

- вычислить теоретические ($K_{\text{ус теор}}$) и экспериментальные ($K_{\text{ус экспер}}$) значения коэффициента усиления инвертирующего усилителя в приведённой таблице;
- записать в отчёт объяснение всех полученных при выполнении задания результатов.

Протокол выполнения задания

Амплитуда входного напряжения $U_{\text{вх}} =$

Частота входного напряжения $F_{\text{вх}} =$

Таблица коэффициента усиления

R1, кОм	R2, кОм	$K_{\text{ус теор}}$	$U_{\text{вых}}, \text{В}$	$K_{\text{ус экспер}}$
5	5			
1	10			
10	5			
10	20			

5.3. Исследование неинвертирующего сумматора напряжений

Подать на первый вход осциллографа синусоидальное колебание с выхода генератора напряжения, расположенного в левом верхнем углу на той же панели, что и схема с ОУ (рис. 9), а на второй вход осциллографа – прямоугольное колебание. Сохранить осциллограммы данных сигналов с экрана осциллографа (при сохранении должны быть видны амплитуды этих сигналов).

Собрать схему для исследования, приведённую на рисунке 14. В качестве входных напряжений $U_{\text{вх1}}$ и $U_{\text{вх2}}$ подать на схему синусоидальное и прямоугольное колебания. Одно из этих напряжений подать также и на первый вход осциллографа, а второй вход осциллографа подключить к выходу схемы усилителя.

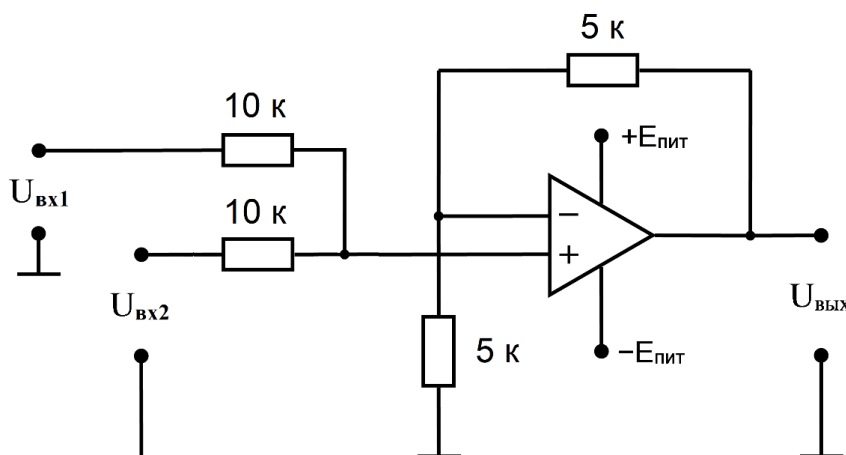


Рис. 14. Схема для исследования сумматора напряжений

Порядок выполнения задания:

- произвести измерения амплитуды входных напряжений схемы, сохранить осциллограммы входных напряжений;
- произвести измерение амплитуды выходного напряжения схемы, сохранить осциллограммы одного из входных и выходного сигналов с экрана осциллографа для последующей вставки в отчёт;
- вычислить теоретическое ($U_{\text{вых рас}}$) значение коэффициента усиления схемы;
- записать в отчёт объяснение всех полученных при выполнении задания результатов.

Протокол выполнения задания

Амплитуда входных напряжений $U_{\text{вх1}} =$, $U_{\text{вх2}} =$

Амплитуда выходного напряжения измеренная $U_{\text{вых изм}} =$

Амплитуда выходного напряжения рассчитанная $U_{\text{вых рас}} =$

5.4. Исследование интегрирующей цепи на ОУ

Соберите схему, изображённую на рисунке 15 с начальным значением $R = 5 \text{ кОм}$. Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ на схему подать с выхода генератора прямоугольных импульсов, расположенного в левом верхнем углу на той же панели, что и схема с ОУ. Это напряжение подать также и на первый вход осциллографа, а второй вход осциллографа подключить к выходу схемы интегратора.

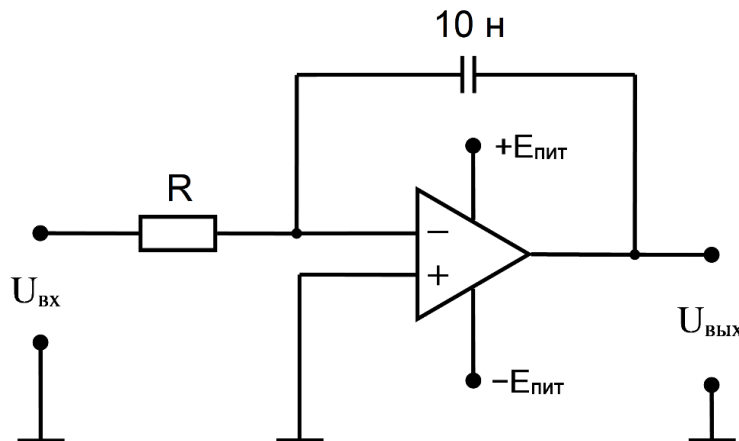


Рис. 15. Схема для исследования интегратора

Порядок выполнения задания:

- с помощью осциллографа измерить и записать амплитуду и частоту подаваемого на вход схемы напряжения;
- произвести измерения амплитуды напряжения на выходе схемы для двух значений резистора R ($R = 5 \text{ кОм}$ и $R = 10 \text{ кОм}$);

- наблюдая осциллограммы, сравнить форму входного и выходного сигналов, сохранить осциллограммы входного и выходного сигналов с экрана осциллографа для последующей вставки в отчёт;
- выбрав $R = 10 \text{ кОм}$ и подав на вход интегратора синусоидальное напряжение с выхода генератора НЧ (рис. 10), измерить с помощью вольтметров PV1.1 и PV1.2 (рис. 11) действующие значения входного и выходного напряжений интегрирующей цепи для указанных в таблице протокола значений частоты с учётом следующих особенностей:
 - > тумблеры режима измерения вольтметров PV1.1 и PV1.2 установить в положение «U~» (измерение действующего значения переменного напряжения);
 - > изменение частоты производится переключением диапазонов генератора («1» и «2») и вращением ручек грубой и точной настройки частоты в соответствии с таблицей в протоколе выполнения задания;
 - > ручка плавного изменения амплитуды выходного напряжения генератора НЧ должна быть установлена в крайнее правое положение, что соответствует максимальной амплитуде;
- вычислить экспериментальные $K_{\text{экспер}}$ и теоретические $K_{\text{теор}}$ значения амплитудно-частотной характеристики интегрирующей цепи для частот из таблицы, построить графики зависимостей данных величин от частоты;
- записать в отчёт объяснение всех полученных при выполнении задания результатов.

Протокол выполнения задания

Амплитуда входного напряжения (прямоугольные импульсы) $U_{\text{вх}} =$

Частота входного напряжения (прямоугольные импульсы) $F_{\text{вх}} =$

Амплитуда выходного напряжения (прямоугольные импульсы на входе):

при $R = 5 \text{ кОм}$ $U_{\text{вх}} =$

при $R = 10 \text{ кОм}$ $U_{\text{вх}} =$

Таблица измерений АЧХ интегрирующей цепи ($R = 10 \text{ кОм}$, $C = 10 \text{ нФ}$)

Параметры генератора НЧ		$F_{\text{вх}}$, Гц	$U_{\text{вх}}$, В	$U_{\text{вых}}$, В	$K_{\text{экспер}}$	$K_{\text{теор}}$
Номер диапазона частот	Коэффициент ослабления сигнала					
1	-40 дБ	25				
		50				
		100				
		200				
2	-20 дБ	500				
		1000				
		1500				
		2000				

5.5. Исследование дифференцирующей цепи на ОУ

Соберите схему, изображённую на рисунке 16 с начальным значением $R = 10 \text{ кОм}$. Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ на схему подать с выхода генератора треугольных импульсов, расположенного в левом верхнем углу на той же панели, что и схема с ОУ. Это напряжение подать также и на первый вход осциллографа, а второй вход осциллографа подключить к выходу схемы.

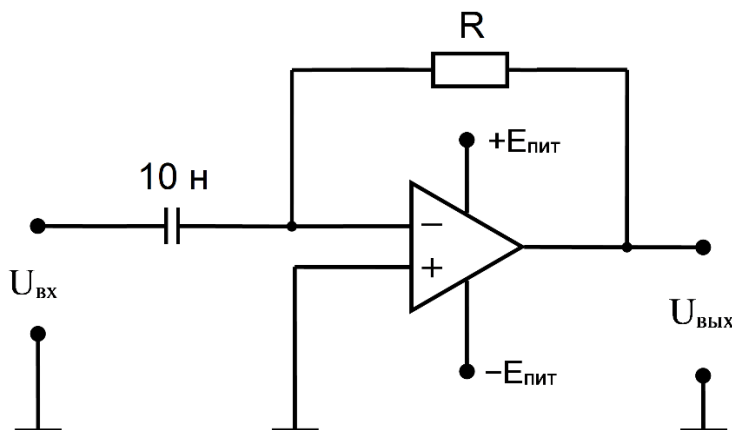


Рис. 16. Схема для исследования дифференцирующей цепи

Порядок выполнения задания:

- с помощью осциллографа измерить и записать амплитуду и частоту подаваемого на вход схемы напряжения;
- произвести измерения амплитуды напряжения на выходе схемы для двух значений резистора R ($R = 10 \text{ кОм}$ и $R = 20 \text{ кОм}$);
- наблюдая осциллограммы, сравнить форму входного и выходного сигналов, сохранить осциллограммы входного и выходного сигналов с экрана осциллографа для последующей вставки в отчёт;
- выбрав $R = 10 \text{ кОм}$ и подав на вход интегратора синусоидальное напряжение с выхода генератора НЧ (рис. 10), измерить с помощью вольтметров PV1.1 и PV1.2 (рис. 11) действующие значения входного и выходного напряжений цепи для указанных в таблице протокола значений частоты с учётом следующих особенностей:
 - > тумблеры режима измерения вольтметров PV1.1 и PV1.2 установить в положение « $U_{\sim}$ » (измерение действующего значения переменного напряжения);
 - > изменение частоты производится переключением диапазонов генератора («1», «2» и «3») и вращением ручек грубой и точной настройки частоты в соответствии с таблицей в протоколе выполнения задания;
 - > ручка плавного изменения амплитуды выходного напряжения генератора НЧ должна быть установлена в крайнее правое положение, что соответствует максимальной амплитуде;

- вычислить экспериментальные $K_{\text{экспер}}$ и теоретические $K_{\text{теор}}$ значения амплитудно-частотной характеристики дифференцирующей цепи для частот из таблицы, построить на одном графике кривые зависимостей данных величин от частоты;
- записать в отчёт объяснение всех полученных при выполнении задания результатов.

Протокол выполнения задания

Амплитуда входного напряжения (треугольные импульсы) $U_{\text{вх}} =$

Частота входного напряжения (треугольные импульсы) $F_{\text{вх}} =$

Амплитуда выходного напряжения (треугольные импульсы на входе):

при $R = 10 \text{ кОм}$ $U_{\text{вх}} =$

при $R = 20 \text{ кОм}$ $U_{\text{вх}} =$

Таблица измерений АЧХ дифференцирующей цепи ($R = 10 \text{ кОм}$, $C = 10 \text{ нФ}$)

Параметры генератора НЧ		$F_{\text{вх}}$, Гц	$U_{\text{вх}}$, В	$U_{\text{вых}}$, В	$K_{\text{экспер}}$	$K_{\text{теор}}$
Номер диапазона частот	Коэффициент ослабления сигнала					
1	0 дБ	25				
		200				
2	0 дБ	500				
		1000				
		1500				
		2000				
3	-20 дБ	5000				
		10000				
		15000				

5.6. Исследование активного полосового RC-фильтра

Соберите схему, изображённую на рисунке 17.

Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ на схему подать с выхода генератора треугольных импульсов, расположенного в левом верхнем углу на той же панели, что и схема с ОУ. Это напряжение подать также и на первый вход осциллографа, а второй вход осциллографа подключить к выходу схемы.

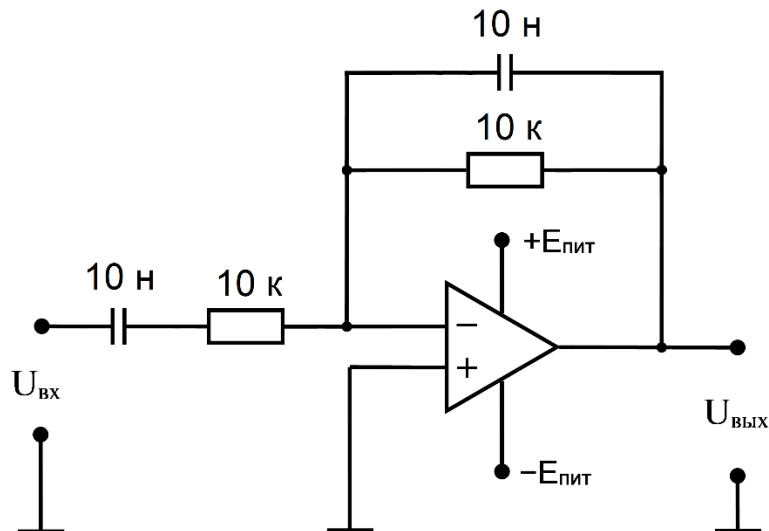


Рис. 17. Схема для исследования активного полосового RC-фильтра

Порядок выполнения задания:

- с помощью осциллографа измерить и записать амплитуду и частоту подаваемого на вход схемы напряжения;
- наблюдая осциллограммы, сравнить форму входного и выходного сигналов, сохранить осциллограммы входного и выходного сигналов с экрана осциллографа для последующей вставки в отчёт;
- подав на вход исследуемой цепи синусоидальное напряжение с выхода генератора НЧ (рис. 10), измерить с помощью вольтметров PV1.1 и PV1.2 (рис. 11) действующие значения входного и выходного напряжений цепи для указанного в таблице протокола диапазона частот (от 220 Гц до 10000 Гц, в 10-12 точках) с учётом следующих особенностей:
 - > тумблеры режима измерения вольтметров PV1.1 и PV1.2 установить в положение «U~» (измерение действующего значения переменного напряжения);
 - > изменение частоты производится переключением диапазонов генератора («2» и «3») и вращением ручек грубой и точной настройки частоты в соответствии с таблицей в протоколе выполнения задания;
 - > ручка плавного изменения амплитуды выходного напряжения генератора НЧ должна быть установлена в крайнее правое положение, что соответствует максимальной амплитуде;
- вычислить экспериментальные $K_{\text{экспер}}$ и теоретические $K_{\text{теор}}$ значения амплитудно-частотной характеристики исследуемой цепи, построить на одном графике кривые зависимостей данных величин от частоты;
- записать в отчёт объяснение всех полученных при выполнении задания результатов.

Протокол выполнения задания

Амплитуда входного напряжения (треугольные импульсы) $U_{вх} =$

Частота входного напряжения (треугольные импульсы) $F_{вх} =$

Таблица измерений АЧХ активного полосового RC-фильтра

Параметры генератора НЧ		$F_{вх}, \text{Гц}$	$U_{вх}, \text{В}$	$U_{вых}, \text{В}$	$K_{экспер}$	$K_{теор}$
Номер диапазона частот	Коэффициент ослабления сигнала					
2	0 дБ	220				
		⋮				
		2000				
3	0 дБ	2500				
		⋮				
		10000				

6. Контрольные вопросы

1. Что такое операционный усилитель ? Перечислите основные отличительные свойства ОУ.
2. Из каких узлов (подсхем) состоит типичный операционный усилитель ?
3. Цепи с какими функциями можно построить на базе операционных усилителей ?
4. Что такое инвертирующее включение ОУ ? Почему оно называется инвертирующим ?
5. Что такое повторитель напряжения и как выглядит схема повторителя напряжения на ОУ ?
6. В чём преимущество использования ОУ при построении полосовых фильтров ?
7. Что такое неинвертирующий сумматор на ОУ ?
8. Напишите выражение для АЧХ дифференцирующей цепи на идеальном ОУ, изобразите качественно АЧХ в виде графика.
9. Напишите выражение для АЧХ интегрирующей цепи на идеальном ОУ, изобразите качественно АЧХ в виде графика.
10. На какой частоте, выраженной в герцах, должен наблюдаться максимум амплитудно-частотной характеристики полосового RC-фильтра, схема которого приведена на рис. 17 ?
11. Напишите выражение для АЧХ активного полосового RC-фильтра на идеальном ОУ, схема которого показана на рис. 17. Изобразите качественно АЧХ в виде графика.

Список литературы

1. Шкелев Е.И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств: Учебное пособие. – Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2012. – 111 с.
2. Валенко В.С. Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств /Под ред. А.А. Ровдо. – М.: Изд. дом «Додэка-XXI», 2001. – 368 с.
3. И. Достал. Операционные усилители: Пер с англ. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
4. А. Дж. Пейтон, В. Волш. Аналоговая электроника на операционных усилителях. – М.: БИНОМ, 1994. – 352 с.

ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Авторы:

Дмитрий Николаевич Ивлев
Дмитрий Валерьевич Савельев

Практикум

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.