

Лабораторная работа № 4

Линейный RC-усилитель

1. Цель работы

Целью работы является исследование общих свойств линейных усилителей (ЛУ), экспериментальное получение частных и временных характеристик линейного усилителя, изучение методик экспериментального определения основных параметров усилителя.

2. Описание лабораторной установки

Установка включает лабораторный пульт с макетом лабораторной работы (рис.1), цифровой двухканальный осциллограф GDS-2062 [1] и генератор сигналов специальной формы GFG-3015 [2]. Подключение генератора к макету выполнено внутри пульта. На схеме (рис. 1) подключение отображено с помощью условного обозначения генератора G .

Макет представляет собой линейный усилитель, выполненный на основе операционного усилителя $LM358$ (усилительный элемент). Параметры усилителя, а также параметры элементов связи и нагрузки можно изменять дискретно с помощью тумблеров " R_{Γ} ", " C_{p1} ", " $C_{вх}$ ", " C_{p2} ", " $R_{н}$ " и " $C_{н}$ " (на рисунке не показаны).

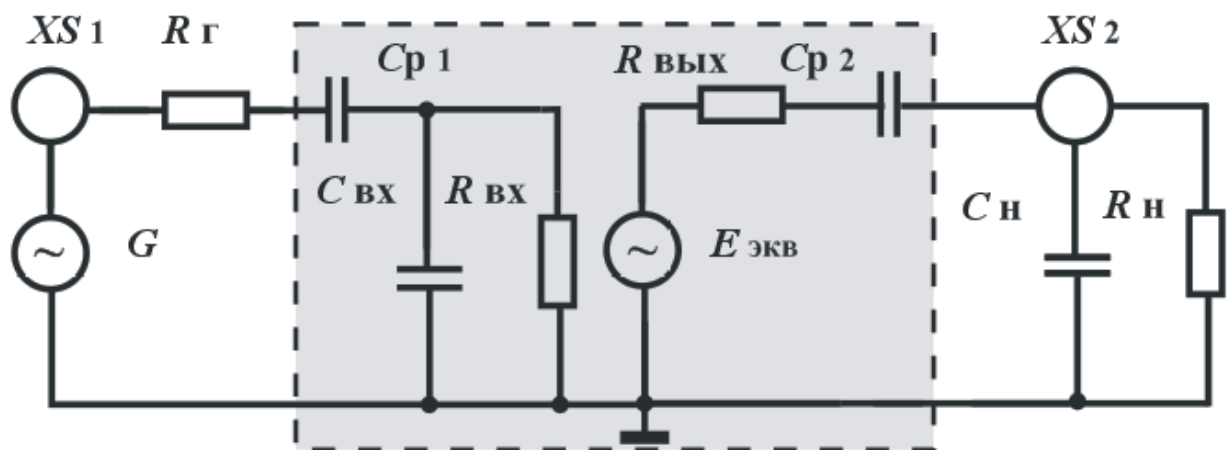


Рис. 1. Схема макета лабораторной установки

3. Подготовка к работе

1. Изучить тему: «Линейный усилитель, основные параметры и характеристики усилителя» (см. п. 6 «Теоретическая справка»).
2. Для усилителя с параметрами элементов, заданными в табл. 1, рассчитать:
 - коэффициент усиления по напряжению в полосе пропускания K_{u0} ,
 - нижнюю и верхнюю граничные частоты амплитудно-частотной характеристики f_n и f_v ,
 - время установления усилителя t_y , если постоянная времени установления собственно усилителя $\tau_y = 1,6$ мкс,
 - относительный спад плоской вершины выходного сигнала δu при заданной (см. табл. 1) длительности входного импульса $t_{\text{вх}}$.

Считать, что для всех вариантов коэффициент усиления в режиме «холостого хода» $K_{\text{ихх}} = 10$, входное сопротивление усилителя $R_{\text{вх}} = 20$ кОм, выходное $R_{\text{вых}} = 20$ кОм.

Номер варианта соответствует порядковому номеру студента в учебном журнале, зафиксированному в начале семестра.

3. Доказать возможность использования предложенных алгоритмов экспериментального определения входного и выходного сопротивления усилителя (см. Методические указания для выполнения рабочего задания).

Таблица 1

Варианты параметров схем усилителя

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$R_{Г}, \text{кОм}$	10	10	10	10	10	10	10	10	20	20
$C_{p1}, \text{нФ}$	47	47	47	47	33	33	33	33	47	47
$C_{BX}, \text{нФ}$	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
$C_{p2}, \text{нФ}$	47	47	47	47	47	47	47	47	33	33
$R_{H}, \text{кОм}$	20	20	40	40	20	20	40	40	20	20
$C_{H}, \text{нФ}$	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
$t_{H BX}, \text{мкс}$	120	120	140	140	100	100	110	110	120	120

Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$R_{Г}, \text{кОм}$	20	20	20	20	20	20	10	10	10	10
$C_{p1}, \text{нФ}$	47	47	33	33	33	33	47	47	47	47
$C_{BX}, \text{нФ}$	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1
$C_{p2}, \text{нФ}$	33	33	33	33	33	33	47	47	47	47
$R_{H}, \text{кОм}$	40	40	20	20	40	40	20	20	40	40
$C_{H}, \text{нФ}$	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
$t_{H BX}, \text{мкс}$	150	150	100	100	120	120	120	120	140	140

Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$R_{Г}, \text{кОм}$	10	10	10	10	20	20	20	20	20	20
$C_{p1}, \text{нФ}$	33	33	33	33	47	47	47	47	33	33
$C_{BX}, \text{нФ}$	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2
$C_{p2}, \text{нФ}$	47	47	47	47	33	33	33	33	33	33
$R_{H}, \text{кОм}$	20	20	40	40	20	20	40	40	20	20
$C_{H}, \text{нФ}$	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
$t_{H BX}, \text{мкс}$	100	100	110	110	120	120	150	150	100	100

4. Рабочее задание

1. Установить параметры элементов исследуемого усилителя в соответствии с вариантом задания.
2. Установить частоту генератора 2,5-3 кГц и амплитуду 2,5 В. Проверить работоспособность усилителя при подаче на вход синусоидального сигнала. Постепенно уменьшая амплитуду сигнала генератора, наблюдать на экране осциллографа искажения формы выходного сигнала и добиться того, чтобы форма выходного сигнала не искажалась, т.е. определить максимальное входное напряжение, которое можно подать на схему для работы усилителя в линейном режиме (**динамический диапазон**). Записать максимальную амплитуду $E_{Г \text{ макс}}$ в протокол. Установить на генераторе амплитуду в 2 раза меньше максимальной $E_{Г \text{ макс}}$. Измерить напряжения на входе и выходе. Определить коэффициент усиления усилителя.
3. С помощью программы **АСН** снять амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) в двойном логарифмическом масштабе. По амплитудно-частотной характеристике определить полосу пропускания усилителя ($f_n \dots f_v$) и коэффициент усиления в полосе пропускания K_{u0} . С помощью найденных данных по формулам связи рассчитать время установления усилителя t_y и относительный спад плоской вершины для импульсного сигнала с заданной длительностью (см. таблицу 1 подготовки к работе).
4. Исследовать временные характеристики усилителя. Для этого подать на вход импульсный сигнал с длительностью импульса $t_{и \text{ вх}}$, указанной в табл. 1. По осциллограммам напряжения на генераторе (входного импульсного сигнала) и выходного напряжения (сигнала) усилителя определить:
 - коэффициент усиления K_{u0} ,
 - относительный спад плоской вершины δu ,
 - время установления усилителя t_y (время фронта $t_{ф}$).

По измеренным данным с помощью формул связи рассчитать нижнюю (f_n) и верхнюю (f_v) частоты усилителя.

5. Результаты выполнения пп. 2-4 занести в сводную таблицу 2.

Таблица 2

Параметр	f_n , Гц	f_v , кГц	t_{ϕ} , мкс	δ , %
Расчет				
Эксперимент				
Расчет по формулам связи				

6. Определить выходное сопротивление усилителя (пункт выполняется по указанию преподавателя).

7. Определить входное сопротивление усилителя (пункт выполняется по указанию преподавателя).

5. Методические указания для выполнения рабочего задания

1. Основные параметры усилителя измеряются при подаче на вход гармонического (синусоидального) сигнала такой амплитуды, чтобы обеспечить **линейный режим усилителя**, при котором **выходной сигнал не должен иметь видимых искажений**, то есть быть тоже гармоническим (синусоидальным). Поэтому при выполнении соответствующих пунктов лабораторной работы один из каналов осциллографа должен быть подключен к выходу усилительного каскада.

2. Основные параметры усилителя измеряются **в полосе пропускания усилителя (область средних частот)**. В данной лабораторной работе экспериментальное определение основных параметров можно проводить на частоте 2...5 кГц.

3. Входное сопротивление каскада можно определить экспериментально, определив при постоянном входном сигнале выходное напряжение для двух

значений сопротивления R_{Γ} (в макете $R_{\Gamma 1}=10$ кОм и $R_{\Gamma 2}=20$ кОм). Алгоритм определения $R_{\text{вх}}$ приведен ниже.

- Подать на вход усилителя синусоидальный сигнал с частотой 2,5 кГц.
- Подключить измерительное сопротивление $R_{\Gamma 1}=10$ кОм.
- Изменяя амплитуду входного сигнала, добиться, чтобы на выходе усилителя не было искажений формы выходного сигнала.
- Определить выходное напряжение $U_{\text{вых1}}$.
- Подключить измерительное сопротивление $R_{\Gamma 2}=20$ кОм.
- Определить выходное напряжение $U_{\text{вых2}}$.
- Рассчитать входное сопротивление усилителя по формуле:

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых1}} R_{\Gamma 1} - U_{\text{вых2}} R_{\Gamma 2}}{U_{\text{вых2}} - U_{\text{вых1}}}.$$

4. Выходное сопротивление можно определить экспериментально, определив выходное напряжение при постоянном входном сигнале для двух значений сопротивления $R_{\text{н}}$ (в макете $R_{\text{н1}}=20$ кОм и $R_{\text{н2}}=40$ кОм) при неизменном входном сигнале. Алгоритм определения $R_{\text{вых}}$ приведен ниже.

- Подать на вход усилителя синусоидальный сигнал с частотой 2,5 кГц.
- Подключить сопротивление нагрузки $R_{\text{н1}}=40$ кОм.
- Изменяя амплитуду входного сигнала, добиться работы усилителя без искажений формы выходного сигнала.
- Определить выходное напряжение $U_{\text{вых1}}$.
- Подключить сопротивление нагрузки $R_{\text{н2}}=20$ кОм.
- Определить выходное напряжение $U_{\text{вых2}}$.
- Рассчитать выходное сопротивление усилителя по формуле:

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{н1}} R_{\text{н2}} (U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}})}{U_{\text{вых2}} R_{\text{н1}} - U_{\text{вых1}} R_{\text{н2}}}.$$

6. Теоретическая справка

Линейным усилителем называется электронное устройство, предназначенное для передачи энергии источника питания в соответствии с формой входного сигнала в нагрузку. Если усиливаемый сигнал передается через разделительный конденсатор, то такой усилитель называется *RC*-усилителем. Обобщенная схема линейного *RC*-усилителя показана на рис. 2.

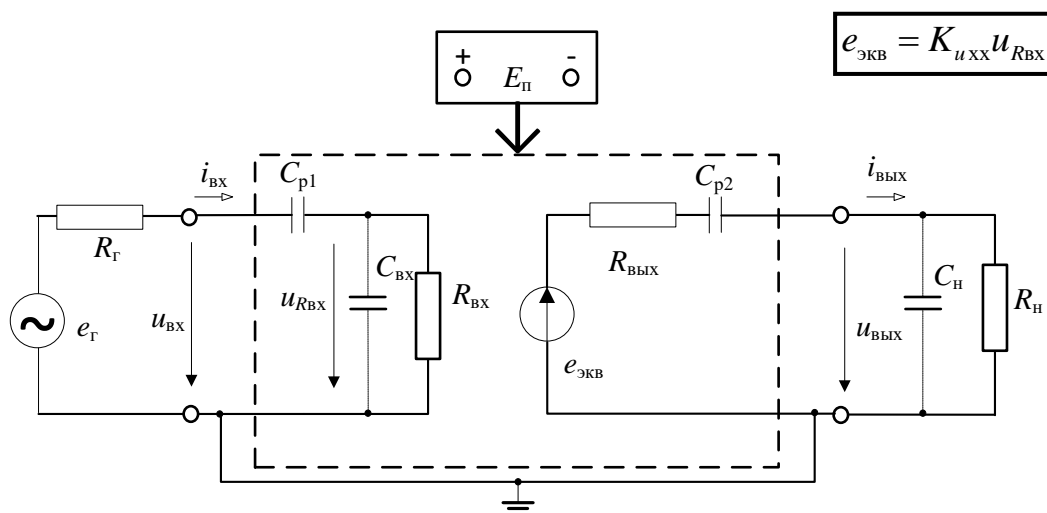


Рис. 2. Обобщенная схема линейного усилителя

Основными параметрами усилителя являются (см. рис. 2):

- входное сопротивление усилителя $R_{ВХ}$;
- входная емкость усилителя $C_{ВХ}$;
- коэффициент усиления напряжения в режиме холостого хода $K_{u\text{ хх}}$;
- выходное сопротивление усилителя $R_{ВЫХ}$.

К основным характеристикам линейного усилителя относятся амплитудная, амплитудно-частотная и временная.

Амплитудная характеристика – зависимость амплитуды гармонического сигнала на выходе усилителя от амплитуды сигнала на его входе (рис. 3). Амплитудная характеристика определяет динамический диапазон входного сигнала $U_{ВХ\text{ макс}}$. В пределах динамического диапазона ($U_{ВХ} < U_{ВХ\text{ макс}}$) усилитель работает в линейном режиме, т.е. $U_{ВЫХ} = K_u U_{ВХ}$. При больших сигналах выходной сигнал ограничивается, что связано с нелинейностью

вольтамперных характеристик биполярных или полевых транзисторов, являющихся основой всех усилителей.

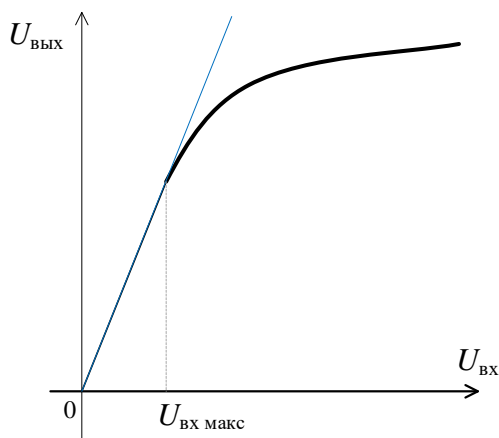


Рис. 3. Амплитудная характеристика усилителя

Амплитудно-частотная (рис. 4) и временная (рис. 5) характеристики усилителя экспериментально снимаются при его работе в линейном режиме. Математические выражения можно получить из рассмотрения обобщенной схемы усилителя (рис. 2).

В области средних частот или в полосе усиления ($f_H \leq f \leq f_B$) коэффициент усиления напряжения постоянен и равен

$$K_{u0} = K_{uXX} \xi_{BX} \xi_{ВЫХ} ,$$

где $\xi_{BX} = \frac{R_{BX}}{R_{BX} + R_{\Gamma}}$ - коэффициент деления сигнала на входе усилителя,

$\xi_{ВЫХ} = \frac{R_H}{R_H + R_{ВЫХ}}$ - коэффициент деления сигнала на выходе усилителя.

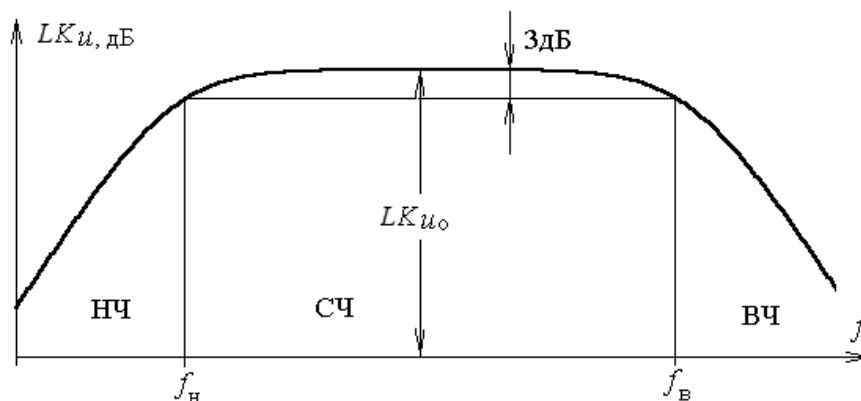


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика

В области низких частот ($f \ll f_H$), а для временной характеристики в области больших времен ($t \gg \tau_B$) можно пренебречь влиянием входной емкости C_{BX} и емкости нагрузки C_H , так как обычно эти емкости малы и их реактивные сопротивления велики. Тогда эквивалентная схема усилителя превращается в два последовательно включенных высокочастотных фильтра с постоянными времени $\tau_{H1} = (R_r + R_{BX})C_{p1}$ и $\tau_{H2} = (R_{ВЫХ} + R_H)C_{p2}$.

Усиленный прямоугольный импульс длительностью t_H на выходе усилителя будет искажен. Из-за разделительных конденсаторов будет иметь место спад плоской вершины. С учетом того, что действуют две RC -цепи можно записать, что относительный спад плоской вершины равен

$$\delta u = \frac{t_H}{\tau_H} \approx \delta u_1 + \delta u_2 = \frac{t_H}{\tau_{H1}} + \frac{t_H}{\tau_{H2}},$$

где τ_H – постоянная времени усилителя в области нижних частот.

Откуда получаем

$$\tau_H \approx \left(\frac{1}{\tau_{H1}} + \frac{1}{\tau_{H2}} \right)^{-1}.$$

Для амплитудно-частотной характеристики постоянная τ_H определяет нижнюю граничную частоту усилителя:

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{1}{\tau_{H1}} + \frac{1}{\tau_{H2}} \right). \quad (1)$$

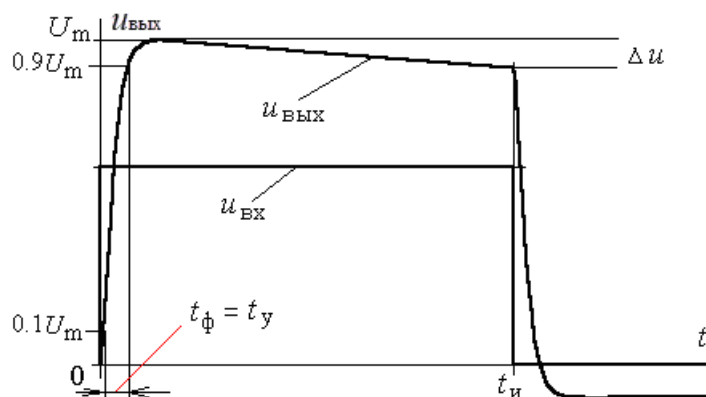


Рис. 5. Временная характеристика усилителя

В области высоких частот ($f \gg f_B$), а для временной характеристики в области малых времен ($t \ll \tau_H$) можно пренебречь сопротивлением разделительных конденсаторов C_{p1} и C_{p2} , так как их емкости велики и на высоких частотах их реактивные сопротивления малы. Тогда входная и выходная цепь превращаются в низкочастотные RC -фильтры с постоянными времени $\tau_{B1} = (R_{\Gamma} \parallel R_{BX})C_{BX}$ и $\tau_{B2} = (R_H \parallel R_{ВЫХ})C_H$. На высокой частоте надо учитывать и свойства самого усилителя – его можно считать инерционным звеном первого порядка с постоянной времени τ_y . Тогда

$$\tau_B = \sqrt{\tau_{B1}^2 + \tau_{B2}^2 + \tau_y^2}.$$

Верхняя граничная частота усилителя определяется через постоянную τ_B следующим образом:

$$f_B = \frac{1}{2\pi\tau_B} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\tau_{B1}^2 + \tau_{B2}^2 + \tau_y^2}}. \quad (2)$$

Связь между временными параметрами усилителя и его частотными параметрами.

1. Время установления усилителя t_y экспериментально определяется через длительность фронта выходного импульса t_{ϕ} , измеряемого по уровням 10%...90%. Вычисляется t_y через верхнюю граничную частоту усилителя

$$f_B \text{ с помощью следующей формулы: } t_y = \frac{0,35}{f_B}.$$

2. Относительный спад плоской вершины равен $\delta u = \frac{\Delta U_{ВЫХ}}{U_{ВЫХ m}}$ и связан с

длительностью входного сигнала t_{BX} и нижней граничной частотой f_H

$$\text{соотношением } \delta u = 2\pi f_H t_{BX}.$$

7. Литература

1. **Генератор сигналов специальной формы GFG-3015.** Руководство по эксплуатации.
2. **Осциллограф цифровой GDS-2062.** Руководство по эксплуатации.
3. **Электротехника и электроника:** Учебник для вузов. В 3-х кн. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники/ Г.П. Гаев, В.Г.
4. **Герасимов, О.М. Князьков и др.;** Под ред. проф. В.Г. Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1998.
5. **Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И.** Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов /Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000.
6. **М.П. Жохова, А.Т. Кобяк, А.П. Батенина, С.В. Лагутина.** Электроника. Сборник задач по аналоговой схемотехнике: В 2 ч. Ч. 1– М.: Издательство МЭИ, 2022. – 60 с.