

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой»



М. Е. Капралов

АНАЛОГОВАЯ СХЕМОТЕХНИКА

Методические указания
к выполнению лабораторных работ
для студентов специальности 1-36 04 02
«Промышленная электроника»

Текстовое электронное издание

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой
2023

1 – дополнительный титульный экран – сведения об издании

УДК 621.38(075.8)

Одобрено и рекомендовано к изданию
методической комиссией факультета компьютерных наук и электроники
в качестве методических указаний
(выписка из протокола № 9 от 25. 05.2023 г.)

Кафедра энергетики и электроники

© Капралов М. Е., 2023
© Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой, 2023

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Аналоговая схемотехника» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Редактор *Т. А. Дарьянова*

Подписано к использованию 08.09.2023.

Объем издания 1,56 Мб. Заказ 359.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет
имени Евфросинии Полоцкой».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа 1 ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ТРАНЗИСТОРАХ	5
Лабораторная работа 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ	19
Лабораторная работа 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В УСИЛИТЕЛЯХ	33
ЛИТЕРАТУРА.....	41

Лабораторная работа 1

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА ТРАНЗИСТОРАХ

Цель работы: исследование характеристик и параметров усилительных каскадов на биполярных (БТ) и полевых (ПТ) транзисторах различными схемами включения.

Краткие сведения из теории

Общие сведения об усилительных устройствах (усилителях)

Усилительным устройством (УУ) называют устройство, позволяющее при наличии на его входе колебания (сигнала) с некоторым уровнем мощности, получить на своем выходе такой же сигнал, но с большим уровнем мощности. Усиление происходит за счет энергии источника питания (ИП). Структурная схема подключения усилительного устройства приведена на рисунке 1.

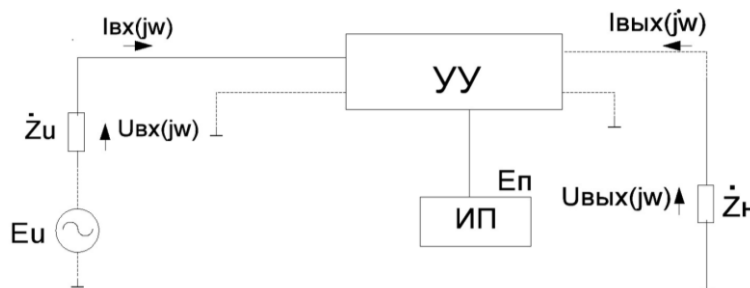


Рисунок 1

Усилительное устройство определяется рядом параметров и характеристик.

Основные параметры и характеристики:

$$K_u(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} - \text{коэффициент усиления по напряжению};$$

$$K_i(j\omega) = \frac{I_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{I_{\text{ВХ}}(j\omega)} - \text{коэффициент усиления по току};$$

$$K_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} - \text{коэффициент усиления по мощности};$$

$$Z_{\text{ВХ}}(j\omega) = \frac{U_{\text{ВХ}}(j\omega)}{I_{\text{ВХ}}(j\omega)} - \text{входное сопротивление усилителя};$$

$$Z_{\text{ВЫХ}}(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{I_{\text{ВЫХ}}(j\omega)} - \text{выходное сопротивление усилителя};$$

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_u} - \text{коэффициент полезного действия усилителя},$$

где $P_{вых}$ – мощность (активная), выделяющаяся на нагрузке;
 $P_{вх}$ – активная мощность, потребляемая входом усилителя;
 P_u – мощность, потребляемая от источника питания.

Все используемые в формулах обозначения токов и напряжений показаны на рисунке 1.

К основным характеристикам усилительного устройства относятся:

- а) амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики;
- б) амплитудная характеристика (АХ);
- в) переходная характеристика.

Амплитудно-частотная характеристика – это модуль коэффициента передачи УУБ, фазочастотная – зависимость фазы $\varphi(\omega)$ от частоты. Они представляют собой линейные характеристики и экспериментально снимаются при малом уровне входного сигнала, когда нелинейными эффектами можно пренебречь. Как правило, строят отдельно графики АЧХ и ФЧХ. Пример построения $|K(j\omega)|$ и $\varphi(\omega)$ показан на рисунке 2.

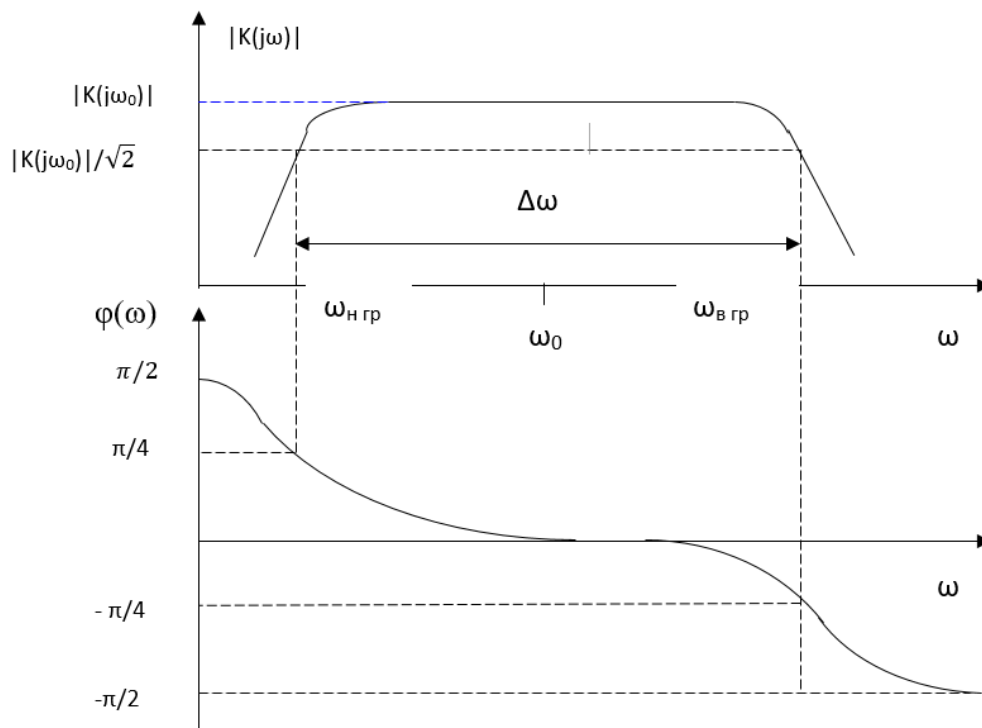


Рисунок 2

Зависимость модуля коэффициента передачи от частоты чаще всего нежелательна и называется частотными искажениями. Диапазон частот, в котором $|K(j\omega)|$ не выходит за некоторые пределы от номинального $|K(j\omega_0)|$

(чаще всего $|K(j\omega_0)|/\sqrt{2}$ – для синусоидального сигнала), называют рабочим диапазоном частот, или полосой пропускания усилителя $\Delta\omega$. Полоса пропускания характеризуется нижней ($\omega_{н гр}$) и верхней ($\omega_{в гр}$) частотами среза.

Амплитудная характеристика – это зависимость амплитуды первой гармоники U_r выходного сигнала УУ от амплитуды входного синусоидального сигнала на некоторой (обычно на средней ω_0) частоте рабочего диапазона. График этой зависимости показан на рисунке 3.

Идеальная АХ – прямая линия, проходящая через начало координат. Реально при больших уровнях входного сигнала ($U_1 > U_{1max}$) выходной сигнал практически перестает возрастать из-за нелинейных эффектов типа отсечки или насыщения транзистора. При малых уровнях ($U_1 < U_{1min}$) выходной сигнал теряется в шумах и помехах усилителя, имеющих на выходе уровень $U_2 \approx U_{2min}$. Таким образом, существуют пределы уровня входного сигнала как сверху, так и снизу, при выходе за которые устройство перестает выполнять свой функции.

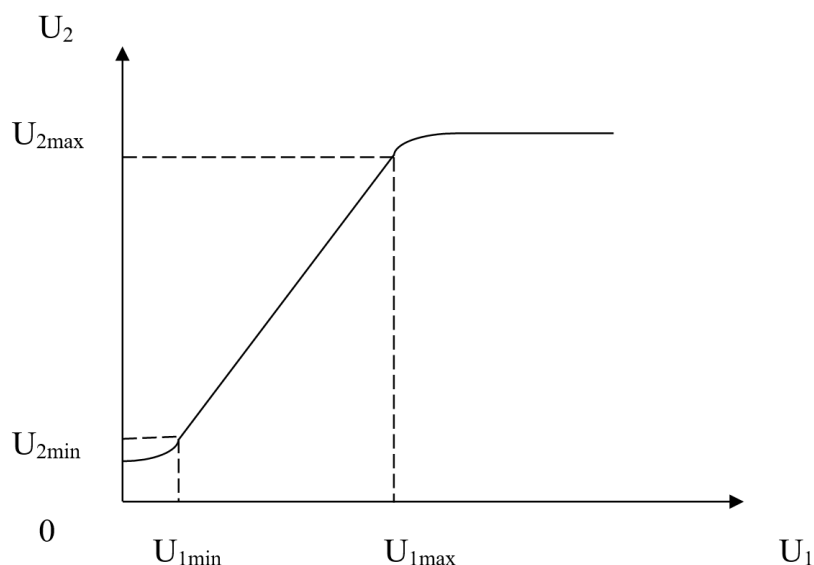


Рисунок 3

Отношение $D = \frac{U_{1max}}{U_{1min}}$ называют динамическим диапазоном усилителя. Величина U_{1max} обычно определяется допустимым коэффициентом нелинейных искажений (гармоник) сигнала K_r :

$$K_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} P_i}{P_1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}{U_1^2}} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} \frac{I_i^2}{I_1^2}},$$

где P_1 – мощность 1-й гармоники на выходе усилительного устройства;
 P_i – мощность i -й гармоники на выходе усилительного устройства ($i > 1$);
 U_i, I_i – амплитуда i -й гармоники напряжения и тока на выходе усилительного устройства ($i > 1$).

Усилительные устройства на биполярном транзисторе

Три варианта включения транзистора в УКУ показаны на рисунках 4 (схема с общим эмиттером), 5 (схема с общей базой) и 6 (схема с общим коллектором).

Входное сопротивление источника сигнала и нагрузка предполагаются безынерционными. Резисторы $R_1, R_2, R_э, R_к$ определяют режим транзистора по постоянному току, а резистор $R_э$, кроме того, создает отрицательную обратную связь (ООС) по постоянному току, обеспечивающую его термостабилизацию. Конденсатор $C_э$ устраняет ООС, создаваемую $R_э$ по переменному току, для чего его сопротивление на частоте сигнала должно быть незначительным (во всяком случае, много меньше сопротивления $R_э$).

Режим транзистора по постоянному току, или начальное положение рабочей точки, можно наглядно показать на выходных характеристиках транзистора, как это сделано на рисунке 7 для схемы с ОЭ.

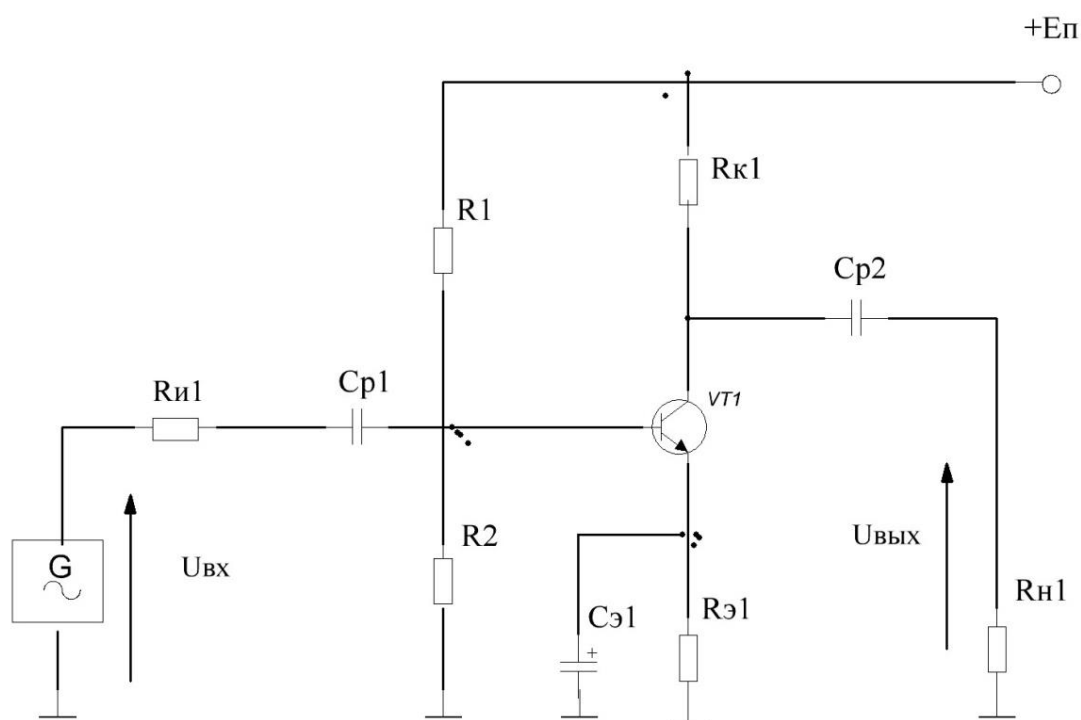


Рисунок 4

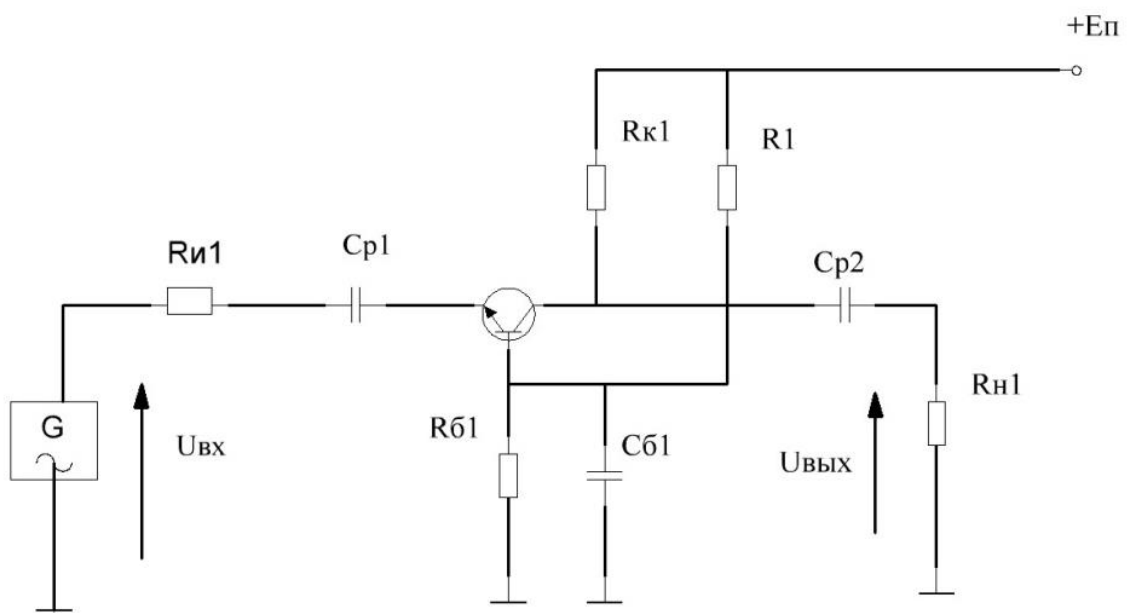


Рисунок 5

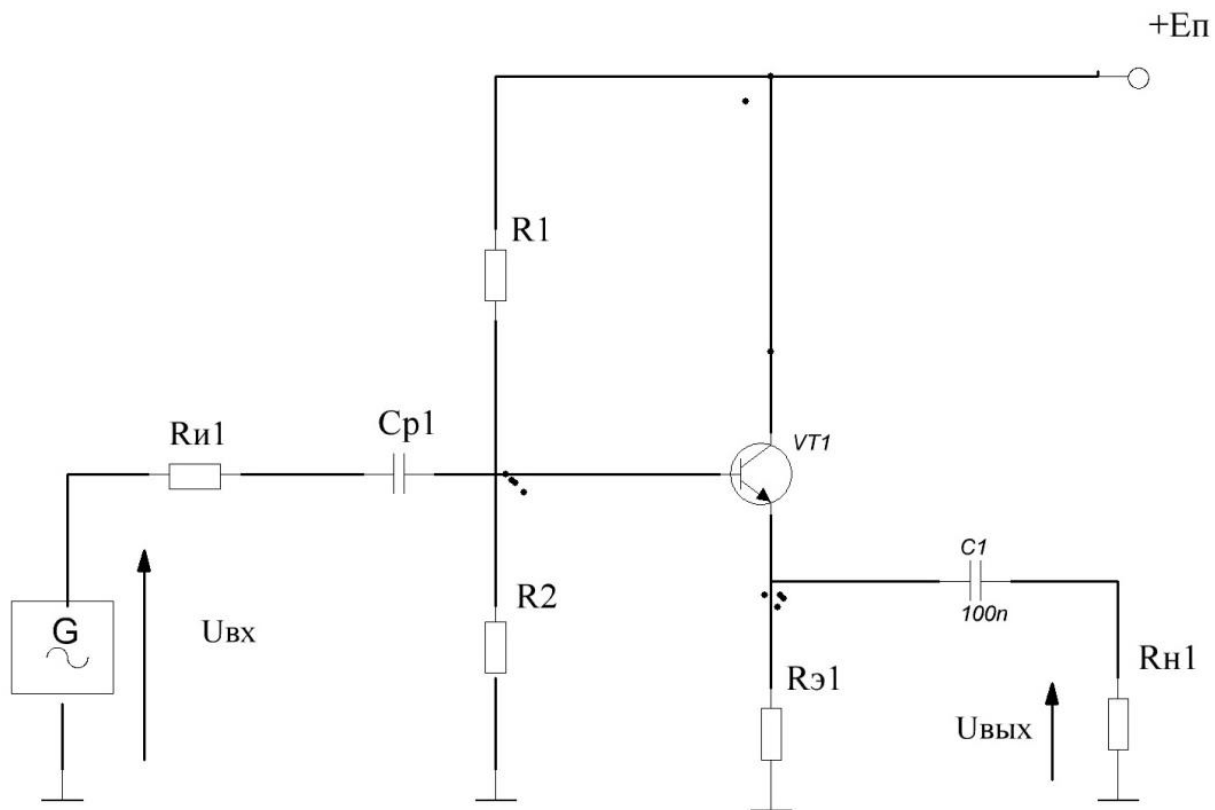


Рисунок 6

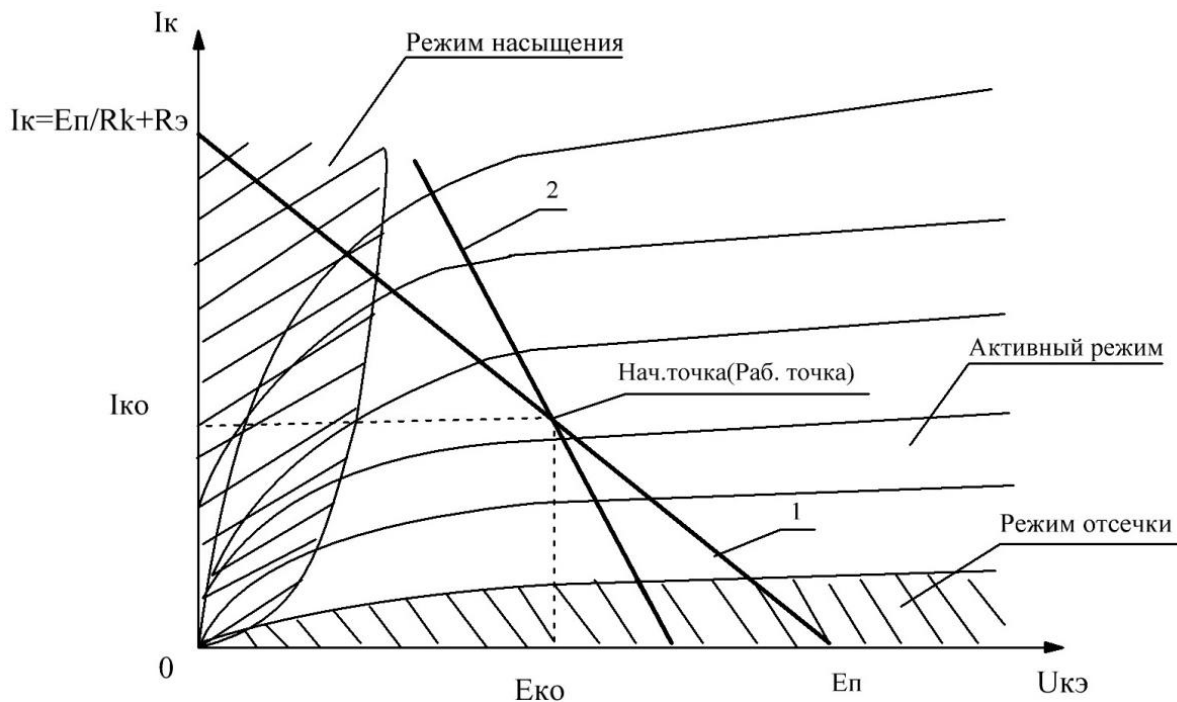


Рисунок 7

Начальная рабочая точка определяется по пересечению статической нагрузочной прямой (кривая 1, см. рисунок 7) зависимости I_k от $U_{кэ}$ при заданном токе базы. Статическая нагрузочная прямая строится исходя из баланса напряжений на схемах усилителей. Для схемы ОЭ имеем

$$U_{кэ} + I_k R_k + I_{э} R_{э} \approx U_{кэ} + I_k (R_k + R_{э}) = E_{п}$$

с учетом того, что $I_k \approx I_{э}$.

Отсюда

$$I_{к0} = \frac{E_{п}}{R_k + R_{э}} - \frac{U_{кэ}}{R_k + R_{э}}$$

В зависимости от положения начальной рабочей точки транзистор может находиться либо в режиме насыщения, либо в режиме отсечки, либо в активном режиме, как показано на рисунке 7. Активный режим используется для усиления сигналов. В этом случае вызываемые входным сигналом колебания напряжения на переходе база-эмиттер транзистора приводят к соответствующему изменению тока базы и коллектора, что в свою очередь изменяет напряжение на нагрузке. Для исключения появления больших нелинейных искажений необходимо обеспечить такое начальное положение

рабочей точки и амплитуду входного сигнала, чтобы на протяжении всего его периода в транзисторе не возникали ни отсечка, ни насыщение. При этом следует помнить, что расчет необходимо вести по динамической нагрузочной линии (кривая 2, см. рисунок 7), в общем случае не совпадающей со статической из-за отличия эквивалентных схем УУ по постоянному и переменному току (влияние $C_э$ и $C_{р2}$). Нагрузочные линии для схем с общим коллектором и общей базой строят аналогично.

Математическое описание работы УУ ведется с использованием одной из физических моделей транзистора. Наиболее распространена нелинейная модель Эберса–Молла. Если уровень сигнала достаточно мал и транзистор для переменной составляющей можно считать линейным устройством, удобно использование получаемой на ее основе гибридной П-модели, или модели Джиаколетто, которая имеет вид, показанный на рисунке 8.

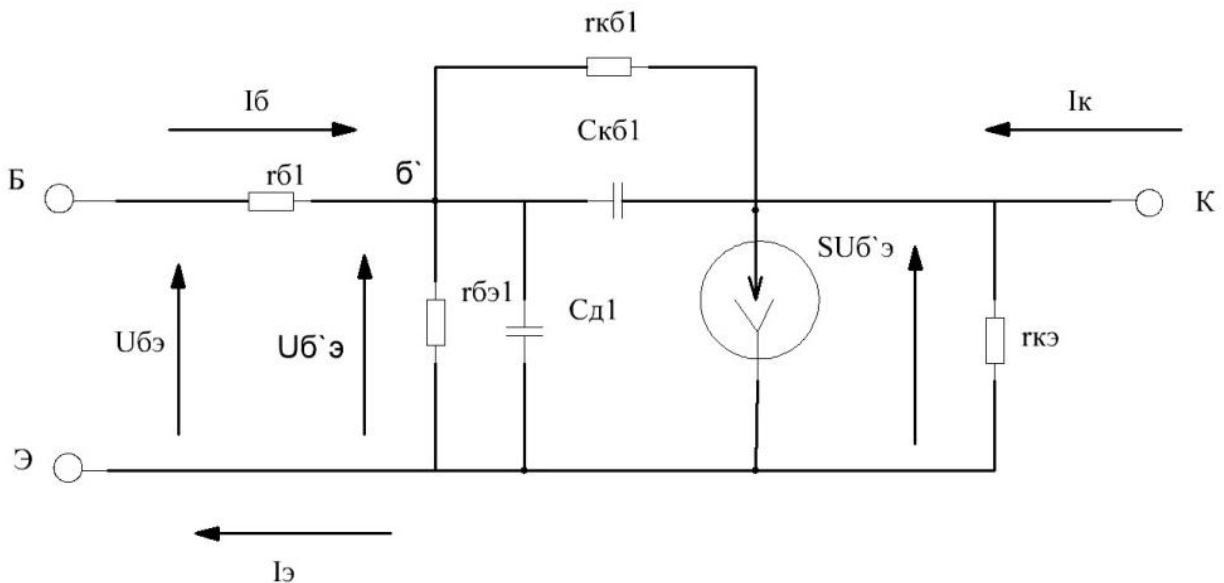


Рисунок 8

Здесь $C_д \approx 10\text{--}20\text{пФ}$ – диффузионная емкость эмиттерного перехода, зависящая от тока покоя транзистора и его конструкции;

$r_б \approx 10\text{--}100\text{ Ом}$ – сопротивление базы (от режима транзистора не зависит);

$$r_{бэ} = (1+\beta) \frac{\varphi r}{I_к} = (1+\beta) r_э;$$

φr – термический потенциал ($\varphi r \approx 25,6 \cdot 10^{-3}\text{А}$);

$\beta = \frac{dI_к}{dI_б} \Big|_{U_{кэ}} = \text{const}$ – коэффициент передачи тока базы;

$$S = \frac{dI_{к}}{dU_{б`э}} | U_{кэ} = \text{const} - \text{крутизна транзистора};$$

$U_{б`э}$ – напряжение между точкой б` и эмиттером;

$С_{кб}$ – емкость коллекторного перехода (зависит от $U_{кб}$); $С_{кб} \approx 0,2-15$ пФ;

$r_{кб}, r_{кэ}$ – сопротивления, учитывающие эффект модуляции ширины базы и составляющие ориентировочно 10^6-10^7 Ом и 10^4-10^6 Ом соответственно.

Для заданного режима по постоянному току и малого входного сигнала модель линейна и рассчитывается линейными методами. Емкости, имеющиеся в схеме, оказывают влияние на работу каскада на высших частотах. Так, емкость $С_{д}$ совместно с $r_{б} || r_{бэ}$ составляет ФНЧ, создающий спад напряжения $U_{б`э}$ с ростом частоты, что ведет к уменьшению $S(j\omega)$.

$$S(j\omega) = \frac{I_{к}(j\omega)}{U_{бэ}(j\omega)} | U_{кэ}(j\omega) = 0.$$

Кроме этого, из-за шунтирования $С_{д}$ сопротивления $r_{бэ}$ падает с ростом частоты коэффициент передачи тока транзистора:

$$\beta(j\omega) = \frac{I_{к}(j\omega)}{I_{б}(j\omega)} | U_{кэ}(j\omega) = 0.$$

Влияние $r_{кб}$ на работу транзистора на ВЧ несущественно из-за его большой величины. Уменьшение $S(j\omega)$ и $\beta(j\omega)$ в общем случае приводит к уменьшению коэффициента усиления каскада на ВЧ. Роль $С_{кб}$ зависит от схемы включения транзистора. Наиболее существенно ее влияние на каскад с ОЭ, т.к. в нем она включена между точкой б` эквивалентной схемы и входом каскада (см. рисунки 4 и 8). В связи с этим напряжение на ней примерно в $(1 + K_0)$ раз больше входного, соответственно увеличивается протекающий через нее ток. В результате по входу транзистора подключена емкость, эквивалентная некоторой емкости $С_{мил} = (1 + K_0)С_{кб}$, включенной из точки б` на корпус. Такой эффект «увеличения» емкости называют эффектом Миллера. При больших K_0 $С_{мил}$, будучи включенной параллельно $С_{д}$, существенно снижает частоту среза каскада. Это является основной причиной относительной узкополосности (малой полосы пропускания) каскада с ОЭ. В схеме с ОК, где $С_{кб}$ включена из точки б` на корпус, и ОБ, где она подключена между выходом каскада и корпусом (если не учитывать $r_{б}$) ее влияние меньше. Ограничивают полосу пропускания каскадов также емкости монтажа $С_{м}$ и нагрузки (последующего каскада) $С_{н}$. В области средних частот, когда можно считать $X_{сд}, X_{сбк}, X_{см}, X_{сн}$ очень большими, а $X_{ср1}$ и $X_{ср2}$ маленькими, эквивалентные схемы транзисторов и каскадов упрощаются и представляют собой соединения резисторов

и источников тока. Наибольший коэффициент усиления по напряжению $K_u(\omega_0)$ в этом случае имеют каскады с ОЭ и ОБ (в пределе нескольких тысяч раз). Для каскада с ОК $K_u(\omega_0) \leq 1$. По току у каскада с ОБ $K_i(\omega_0) \leq 1$, у каскадов с ОЭ и ОК $K_i(\omega_0) \approx \beta$, где β – это статический коэффициент передачи тока (на низких частотах), его величина указывается для конкретного транзистора в технических условиях. Наибольшим входным сопротивлением $R_{вх} \approx \beta \cdot R_э$ (см. рисунок 6) обладает каскад с ОК, наименьшим $R_{вх} \approx r_э$ – каскад с ОБ. Входное сопротивление каскада с ОЭ $R_{вх} \approx \beta \cdot r_э$. У каскадов с ОЭ и ОБ выходное сопротивление велико и практически определяется R_k . У каскада с ОК, при достаточно большом β , $R_{вых} \approx r_э$. На низких частотах необходимо учитывать влияние C_{p1} и C_{p2} , т.к. часть НЧ сигнала падает на них, что приводит к уменьшению коэффициента усиления каскада. Каскад с ОК, как имеющий наибольшее входное сопротивление, требует минимальной величины C_{p1} при той же нижней частоте среза, а каскад с ОБ – наибольшей.

Усилительные устройства на полевых транзисторах

Три варианта включения полевого транзистора с общим истоком (ОИ), общим затвором (ОЗ) и общим стоком (ОС) показаны на рисунках 9–11 соответственно.

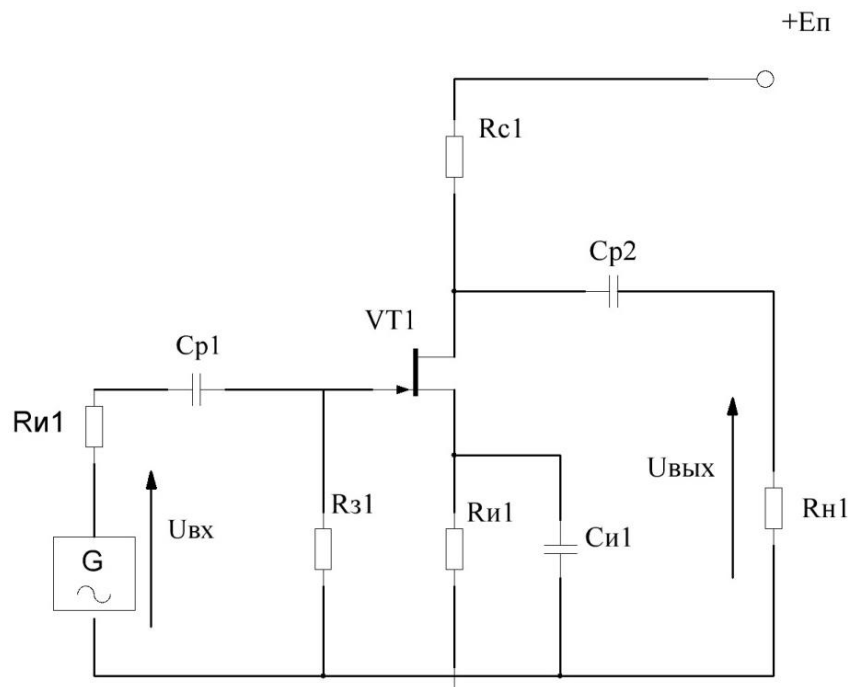


Рисунок 9

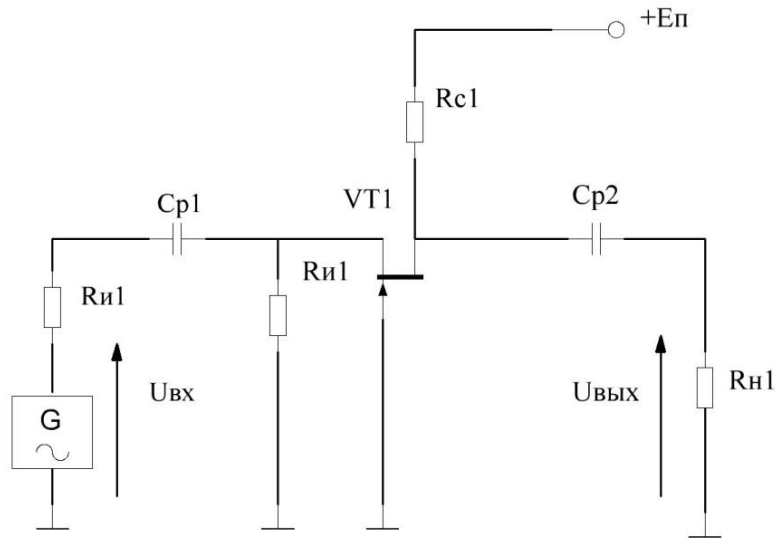


Рисунок 10

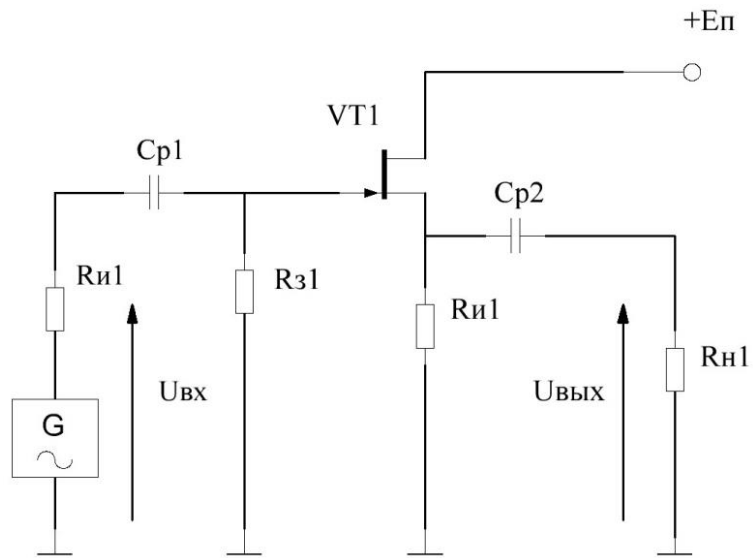


Рисунок 11

Эквивалентная схема полевого транзистора показана на рисунке 12.

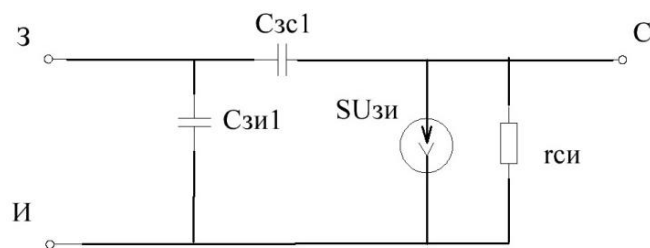


Рисунок 12

Здесь $C_{зс} \approx 0,1-0,5\text{пФ}$ и $C_{зи} \approx 1-10\text{пФ}$ – емкости затвор-сток и затвор-исток соответственно;

$$S = \left. \frac{dI_c}{dU_{зи}} \right|_{U_{си}=\text{const}} \quad \text{– крутизна транзистора;}$$

I_c – ток стока транзистора;

$U_{зи}$ – напряжение затвор-исток транзистора;

$U_{си}$ – напряжение сток-исток транзистора;

$r_{си}$ – сопротивление между стоком и истоком транзистора.

Особенности схем на ПТ по сравнению с БТ вытекают из сравнения их эквивалентных схем. Так, в области средних частот входное сопротивление схем с ОИ и ОЗ, при соответствующем выборе $R_з$, значительно больше, чем у соответствующих им схем с ОЭ и ОК. У схем на МДП и МОП транзисторах оно может достигать нескольких $M\Omega$. Входное сопротивление в схеме ОЗ достаточно мало и составляет величину $R_{вх} \approx 1/S$. Коэффициент усиления по току у схем с ОИ и ОС также существенно больше, чем у аналогичных им схем с ОЭ и ОК. Выходные сопротивления схем ОИ и ОЗ практически всегда определяются величиной R_c (из-за ее малости по сравнению с $r_{си}$), а выходное сопротивление каскада ОС составляет величину $R_{вых} \approx 1/S$. В области высоких частот входное сопротивление схем с ОИ и ОС имеет емкостной характер и падает с ростом частоты. Достоинством ПТ, по сравнению с БТ, является также, в общем случае, более низкая величина проходной емкости $C_{зи}$ по сравнению с аналогичной $C_{бк}$, что уменьшает влияние эффекта Миллера и позволяет обеспечивать большую устойчивость работы схемы на высоких частотах. В области низких частот при одинаковых полосах пропускания каскады с ОИ и ОС имеют меньшую $S_{р1}$, чем аналогичные им каскады с ОЭ и ОК из-за большого входного сопротивления.

Описание лабораторного макета

Лабораторный макет универсален и позволяет посредством коммутации тумблерами собирать усилительные каскады с различными схемами включения транзистора. Электрическая принципиальная схема макета приведена на его передней панели.

Порядок выполнения работы

1. Измерение входного сопротивления ($R_{вх}$) каскадов.
 - 1.1. Включите лабораторную установку и контрольно-измерительную аппаратуру.

1.2. Соберите схему с ОЭ (см. рисунок 4) и подайте на ее вход через градуированное резистивное сопротивление синусоидальный сигнал частотой 1 кГц и уровнем 10 ± 2 мВ.

1.3. Добейтесь средствами изменения величины отградуированного сопротивления (магазина сопротивлений) того, чтобы уровень сигнала на входе каскада был равен половине уровня сигнала генератора. При этом полученное значение отградуированного сопротивления будет равно входному сопротивлению каскада.

1.4. Проведите аналогичные измерения для каскадов, в которых транзистор включен по схеме ОБ, ОК для БТ и ОИ, ОЗ, ОС для ПТ.

2. Измерение выходного сопротивления ($R_{\text{вых}}$) каскадов.

2.1. Соберите схему с ОЭ и подайте на ее вход синусоидальный сигнал частотой 1 кГц и уровнем, при котором уровень сигнала на выходе схемы при отключенной нагрузке составляет 100 ± 20 мВ.

2.2. Подключите к выходу схемы отградуированное сопротивление и подберите его величину таким образом, чтобы уровень сигнала на выходе стал в 2 раза меньше исходного (т.е. чем при отключенной нагрузке). Полученное при этом значение сопротивления будет равно выходному.

2.3. Выполните пункт 1.4.

3. Измерение коэффициентов усиления (передачи) напряжения K_{uo} , тока K_{io} , мощности K_{po} усилительных каскадов.

3.1. Соберите схему с ОЭ и подайте на ее вход синусоидальный сигнал частотой 1 кГц и уровнем 10 ± 2 мВ, подключив у выходу усилителя нагрузку с сопротивлением, равным выходному.

3.2. Найдите коэффициент усиления каскада по напряжению как отношение уровней выходного ($U_{\text{вых}}$) и входного ($U_{\text{вх}}$) сигналов.

3.3. Определите коэффициенты передачи по току и мощности:

$$K_{io} = \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}} = \frac{\frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{вых}}}}{\frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}} = K_{uo} \cdot \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вых}}}$$

$$K_{po} = K_{uo} \cdot K_{io} = K_{uo}^2 \cdot \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вых}}} = K_{io}^2 \cdot \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вых}}}$$

3.4. Выполните пункт 1.4.

4. Снятие и построение амплитудной характеристики усилительных каскадов.

4.1. Выполните пункт 3.1.

4.2. Плавно увеличьте уровень входного сигнала до величины, при которой на выходе сигнал заметно исказится.

4.3. Увеличьте входной сигнал еще на 6дБ (2 раза по напряжению) и запишите измеренные вольтметром (осциллографом) уровни выходного и входного сигналов.

4.4. Последовательно уменьшая уровень входного сигнала через 3дБ ($\approx 1,4$ раза по напряжению), снимите зависимость уровня выходного сигнала от уровня входного. Измерения прекратите, когда уровень входного сигнала упадет на 18 дБ относительно установленного в пункте 4.3.

4.5. Выполните пункт 1.4.

5. Содержание отчета:

- Таблицы измерений.
- Результаты расчетов.
- Графики АЧХ и АХ каскадов.
- Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Определите по принципиальной схеме усилительного каскада способ включения транзистора.

2. Сравните усилители с ОЭ, ОБ, ОК с ОИ, ОС по коэффициентам усиления K_u , K_i , K_p .

3. В каком усилителе осуществляется усиление по току и по мощности?

4. В каком усилителе осуществляется усиление по напряжению и мощности?

5. Какой усилитель обеспечивает максимальное усиление по мощности? Почему?

6. Сравните усилители с ОЭ, ОБ, ОК с ОИ, ОС по значениям $R_{вх}$ и $R_{вых}$. Чем обусловлено их различие?

7. Сравните частотные свойства каскадов с ОЭ, ОБ, ОК с ОИ, ОС и объясните причины различия.

8. Объясните назначение отдельных компонентов схем усилителей с ОЭ, ОБ, ОК, ОИ, ОС, ОЗ.

9. Как зависят $R_{вх}$, $R_{вых}$, K_u , K_i , K_p усилителей с ОЭ, ОБ, ОК и с ОИ, ОС, ОЗ от значений электрических параметров отдельных компонентов?

10. Когда следует применять усилительные каскады, включенные по схеме с ОЭ, ОБ, ОК или с ОИ, ОЗ, ОС?

11. Назовите основные способы задания режима транзистора в усилительных каскадах с ОЭ, ОБ, ОК и с ОИ, ОЗ, ОС.

12. Как построить нагрузочную линию транзистора по постоянному и переменному току?

13. Объясните влияние температуры на режим работы усилительных каскадов с ОЭ, ОБ, ОК и с ОИ, ОЗ, ОС.

14. Какие Вы знаете способы температурной стабилизации режима работы усилительных каскадов?

Лабораторная работа 2 ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ

Цель работы: изучение принципа работы, основных параметров и характеристик операционного усилителя (ОУ) и его использования для построения некоторых электронных схем.

Краткие сведения из теории

Операционный усилитель – это усилитель постоянного тока (чаще всего дифференциальный), особенностью которого является достаточно большой коэффициент усиления. Такой усилитель часто используется для выполнения математических операций над сигналами и поэтому называется операционным. Выполняемые ОУ операции могут быть линейными (сложение, вычитание, умножение на постоянный коэффициент, дифференцирование, интегрирование) и нелинейными (логарифмирование, нахождение экспоненты и др.), что определяется видом обратной связи (линейная или нелинейная).

На рисунке 1 показано условное обозначение ОУ (один из вариантов).

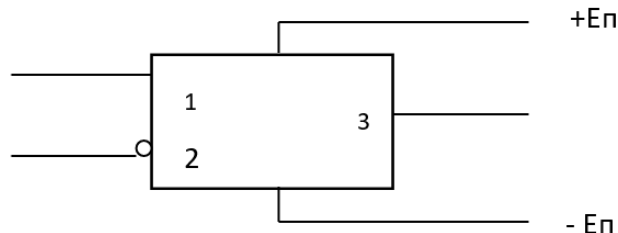


Рисунок 1

Вход 1 – неинвертирующий, вход 2 – инвертирующий. Усиленный сигнал снимается с выхода 3.

Амплитудная характеристика ОУ показана на рисунке 2.

Кривая 1 соответствует подаче входного напряжения на инвертирующий вход при заземленном неинвертирующем. Кривая 2 соответствует подаче напряжения на неинвертирующий вход. Если при $U_{вх} = 0$ значение $U_{вых} = 0$, то усилитель называют отбалансированным. На практике для выполнения балансировки в ОУ существуют специальные входы, к которым подключается балансирующий резистор. Входной сигнал, поступающий одновременно на входы 1 и 2, называют синфазным, а сигнал, поступающий на входы 1 и 2 в противофазе, – дифференциальным. Формально при сложном входном

сигнале синфазная составляющая входного напряжения определяется как $U_{сф} = \frac{U_{вх1} + U_{вх2}}{2}$, а дифференциальная $U_{д} = U_{вх1} - U_{вх2}$, где $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ напряжения между входами 1 и 2 соответственно и корпусом. ОУ должен максимально подавлять синфазный сигнал и максимально усиливать дифференциальный. Степень подавления характеризуется величиной коэффициента ослабления синфазного сигнала (КОСС), который равен $КОСС = 20 \lg \frac{K_{д}}{K_{сф}}$, где $K_{д}$ – коэффициент усиления дифференциального сигнала; $K_{сф}$ – коэффициент усиления синфазного сигнала.

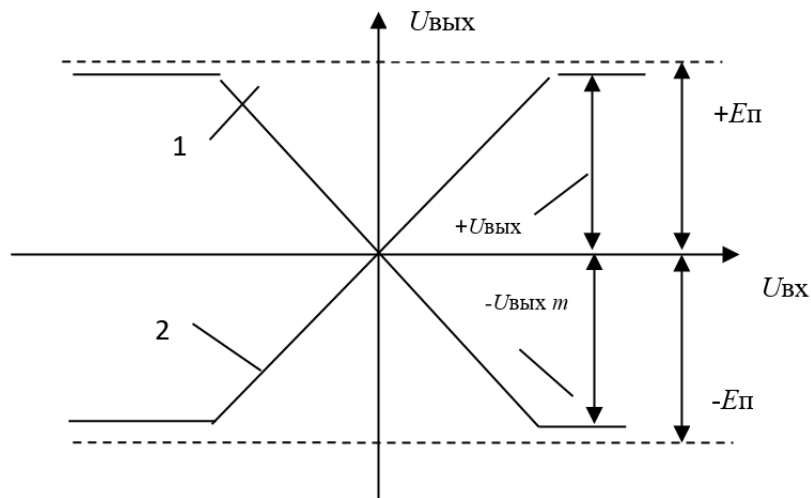


Рисунок 2

Типовая ЛАЧХ ОУ для дифференциального входного сигнала показана на рисунке 3.

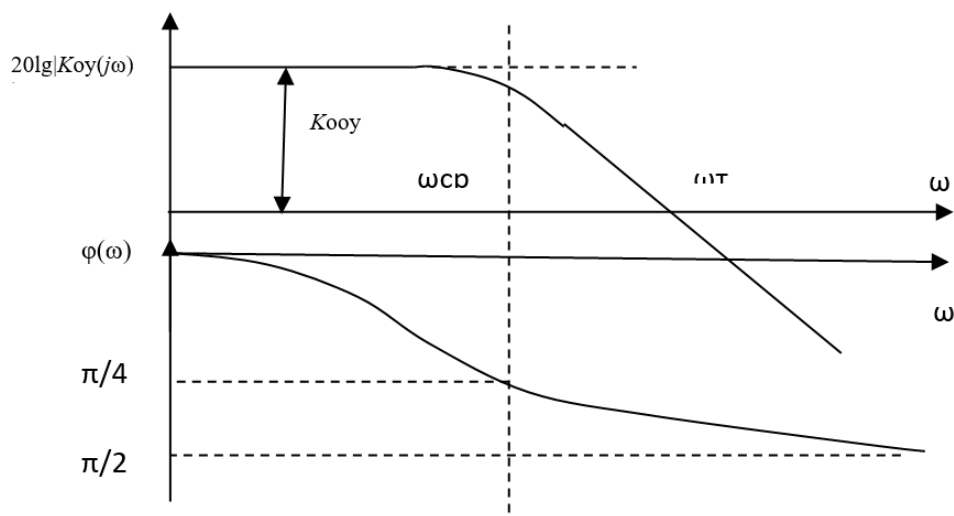


Рисунок 3

Здесь K_{00} – дифференциальный коэффициент усиления на низких частотах; ω_t – частота среза, на которой коэффициент передачи падает до 0,707 раз (или на 3дБ) от K_{00} .

Для ОУ общего применения ориентировочная величина K_{00} составляет 10–100 тысяч раз, ω_t – 1–10 МГц, $\omega_{ср}$ – 10–100 Гц. В ОУ специального назначения эти параметры могут быть значительно лучше. Существует тип ОУ, у которых наклон АЧХ постоянен и составляет 6 дБ/октаву (20 дБ/декаду). Это обеспечивается за счет введения в схему ОУ специальной корректирующей емкости. Такие усилители называются ОУ с полной внутренней коррекцией; в разрабатываемых на их основе схемах легче обеспечить устойчивость. Входное сопротивление ОУ велико и составляет величину от десятков кОм до сотен МОм в зависимости от схемы. Выходное сопротивление достаточно мало (ориентировочно десятки Ом). Описанные ранее параметры ОУ характеризуют его работу при малом уровне выходного сигнала (в линейном режиме). Работа ОУ при большом уровне сигнала, когда сказывается нелинейность входящих в схему элементов, характеризуется рядом нелинейных параметров, важнейшими из которых являются максимальная скорость нарастания выходного напряжения и ширина полосы пропускания при максимальной мощности (Δf_m). $U_{нар} = \frac{dU_{ВЫХ}}{dt}$ – это скорость нарастания выходного напряжения при подаче на вход ОУ скачка напряжения (рисунок 4).

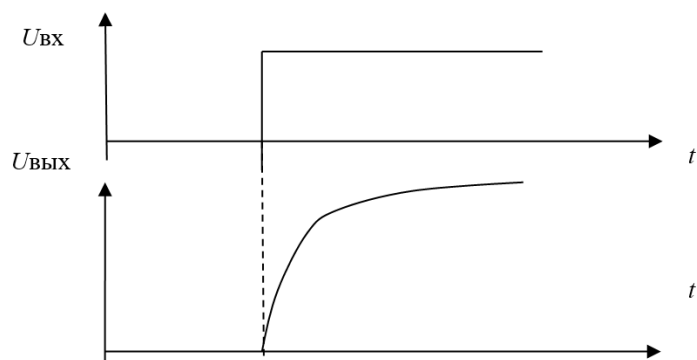


Рисунок 4

Δf_m – это полоса частот входного сигнала, в которой на выходе может быть получено неискаженное синусоидальное напряжение максимальной амплитуды. Максимальная амплитуда соответствует $U_{вых\ m}$ на рисунке 2.

Между $U_{нар}$ и Δf_m существует связь: $U_{нар} \approx 2\pi \Delta f_m \cdot U_{вых\ m}$.

Величины $U_{нар}$ и Δf_m определяются соотношением имеющихся в схеме емкостей (в частности, корректирующих) и токами, которые могут выдать схему для их перезарядки и, соответственно, изменения напряжения на выходе.

В зависимости от того, на какие входы ОУ воздействуют входные сигналы, различают три вида включения ОУ: инвертирующее (рисунок 5, а), неинвертирующее (рисунок 5, б) и дифференциальное (рисунок 5, в).

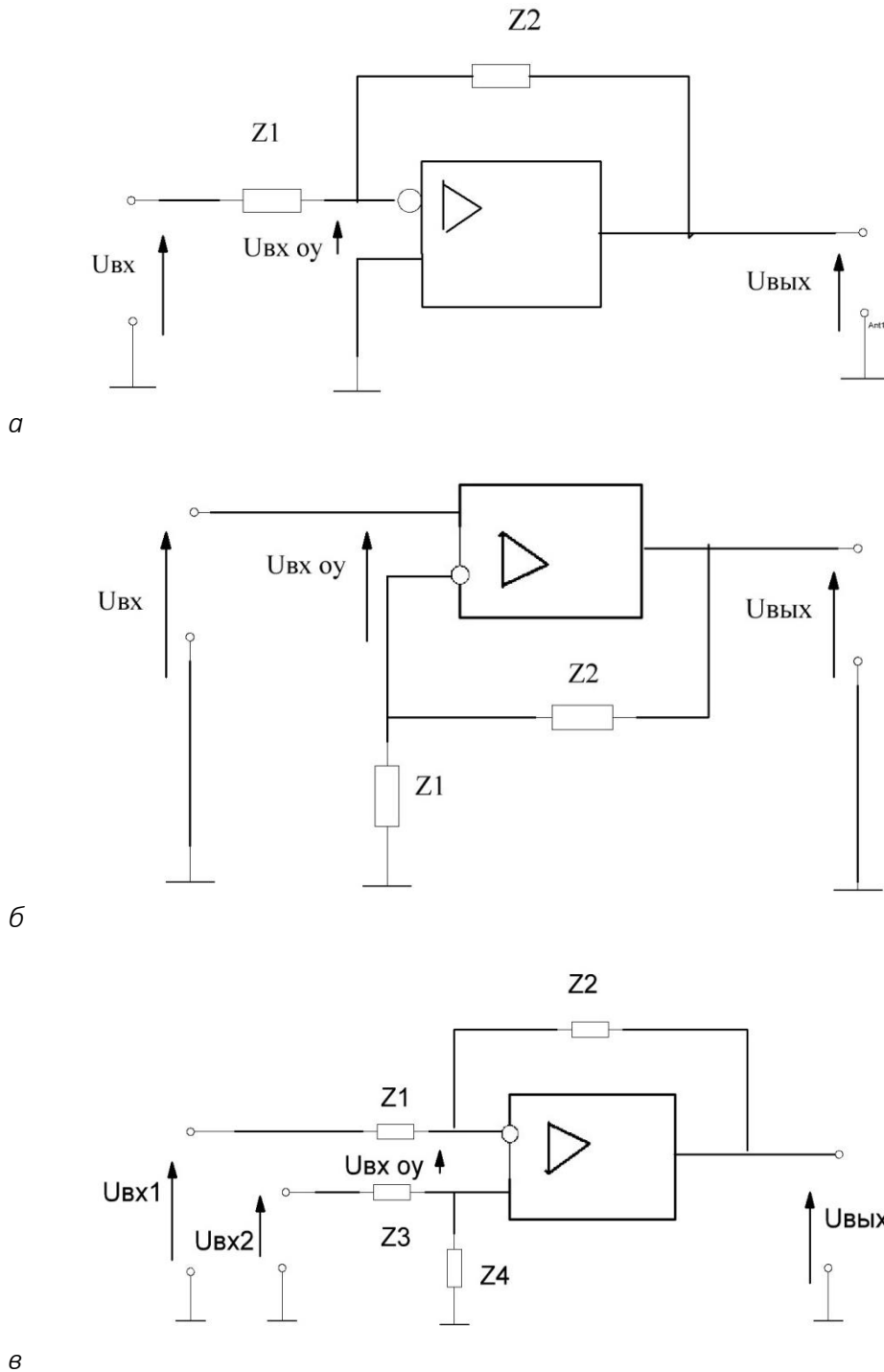


Рисунок 5

ОУ в режиме масштабирующего инвертирующего усилителя

Схема строится на основе показанной на рисунке 5, а и выполняет функцию усиления входного сигнала с некоторым коэффициентом. Она изображена на рисунке 6. В этом устройстве выходной сигнал сигнал противофазен (проинвертирован) по сравнению со входным. ОУ в данной схеме охвачен параллельной отрицательной обратной связью (ОС) по напряжению. Глубина этой ОС:

$$\beta = R1/(R1 + R2).$$

$$\text{Если } K_{оу} \gg K_0, \text{ то } U_{вх.оу} = \frac{U_{вых}}{K_{оу}} = \frac{U_{вх} \cdot K_0}{K_{оу}} \ll U_{вх}.$$

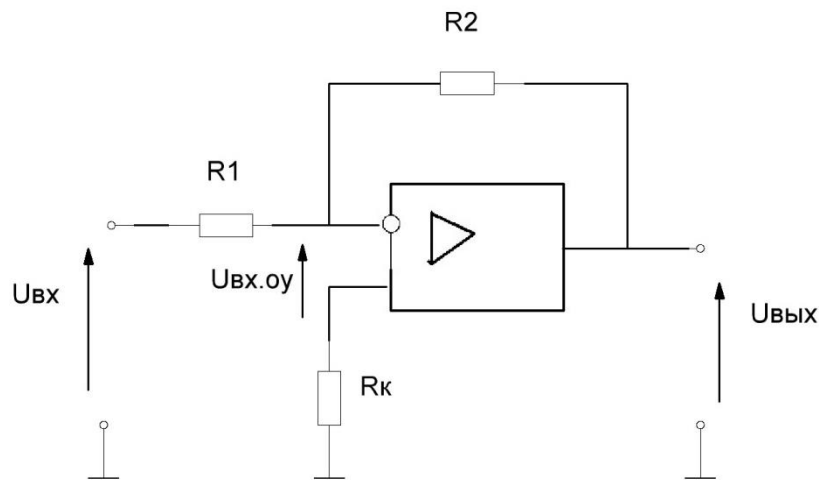


Рисунок 6

То есть в этом случае можно считать, что $U_{вх.оу} \approx 0$, тогда

$$U_{вых} \approx -U_{вх} \cdot \frac{R2}{R1} = U_{вх} \cdot K_0.$$

В таком случае $K_0 = -R2/R1$.

Точность выполнения этого соотношения зависит от глубины ОС. Кроме этого, при $K_0 \cdot \beta \gg 1$ можно считать, что входное сопротивление схемы $R_{вх} \approx R1$. Выходное сопротивление $R_{вых}$ существенно меньше, чем у ОУ без ОС:

$$R_{вых} = \frac{R_{вых оу}}{1 + \beta K_0 оу}.$$

Если $R1 = R2$, то усилитель представляет собой инвертирующий повторитель напряжения. Функция R_k состоит в обеспечении компенсации смещения

выхода ОУ под воздействием разности входных токов при $U_{вх} = 0$. Его величина в данном случае равна $R_k = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$.

Инвертирующее включение ОУ может быть использовано для алгебраического суммирования входных сигналов, как показано на рисунке 7.

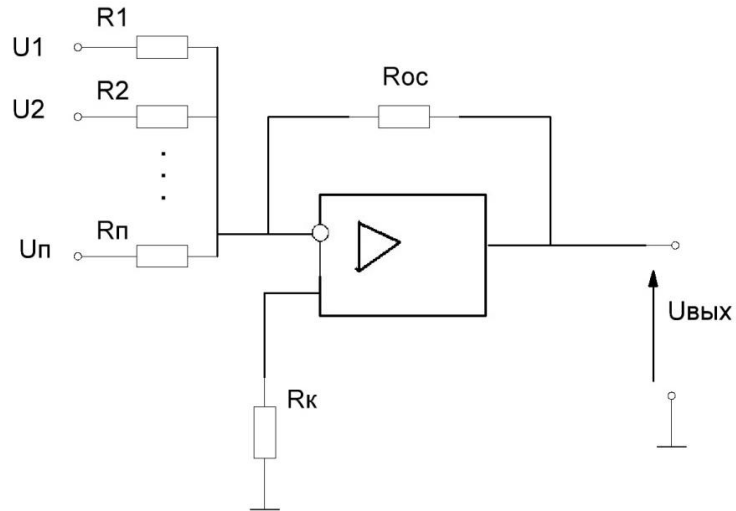


Рисунок 7

При этом

$$U_{\text{вых}} = U_1 \frac{R_{oc}}{R_1} + U_2 \frac{R_{oc}}{R_2} + \dots + U_n \frac{R_{oc}}{R_n}.$$

если $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_{oc}$, то $U_{\text{вых}} = (U_1 + U_2 + \dots + U_n)$.

ОУ в режиме масштабного неинвертирующего усилителя

Схема такого устройства строится на основе схемы, приведенной на рисунке 5, б, и имеет вид, показанный на рисунке 8.

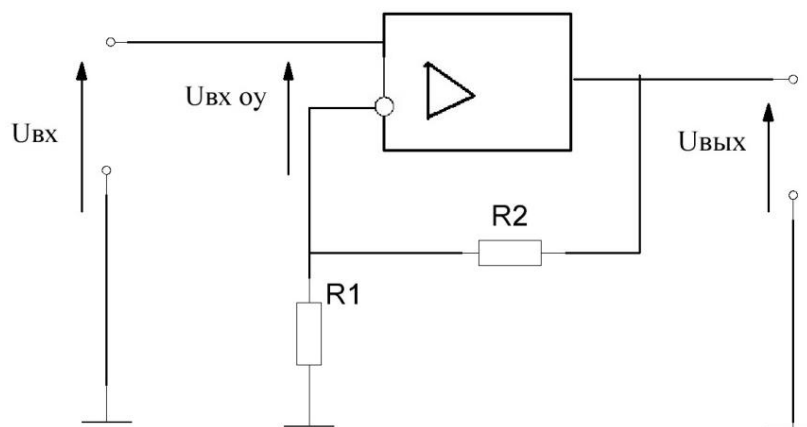


Рисунок 8

Особенностью такого устройства является то, что оно не инвертирует фазу усиливаемого сигнала. В отличие от предыдущей схемы здесь использована последовательная ООС по напряжению. Глубина этой ОС такая же, что и при инвертирующем включении:

$$\beta = R1/(R1+R2).$$

По аналогичным причинам можно считать, что при глубокой ОС $U_{вх} \gg U_{вх.оу} \approx 0$.

Коэффициент усиления схемы

$$K_0 = U_{вых}/U_{вх} \approx U_{вых}/U_{R1} = \frac{U_{вых}}{U_{вых} \frac{R1}{R1+R2}} = (R1+R2)/R1 = 1/\beta.$$

Входное сопротивление схемы $R_{вх} = R_{вх.оу} \cdot (1 + \beta K_{ооу})$.

Выходное сопротивление схемы $R_{вых} = R_{вых.оу} / (1 + \beta K_{ооу})$.

Если $R2=0$, то $K_0 = 1$, то есть схема выполняет функцию неинвертирующего повторителя напряжения.

Дифференциальный усилитель на ОУ

На основе схемы на рисунке 5, в может быть построен дифференциальный усилитель, который показан на рисунке 9.

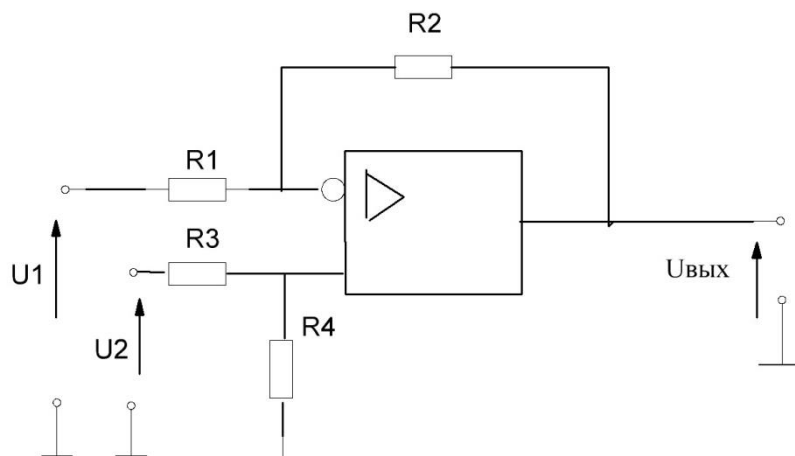


Рисунок 9

В этой схеме

$$U_{вых} = U2 \cdot \frac{R4}{R3+R4} \cdot \frac{R2+R1}{R1} - U1 \frac{R2}{R1}.$$

Если $R1 = R2$, а $R3 = R4$, то $U_{\text{вых}} = U2 - U1$, т.е. схема вычитает входные напряжения.

Все из рассмотренных схем выполняют свои функции в ограниченном диапазоне частот, где модуль петлевого усиления $|K_{\text{ооу}}(j\omega)| \cdot \beta \gg 1$. Для оценки этого диапазона, а также степени устойчивости системы строят ЛАЧХ устройств с разомкнутой обратной связью. Наименьшим диапазоном устойчивости обладают схемы с максимальным β . Для обеспечения необходимого запаса их устойчивости применяют либо ОУ с полной внутренней коррекцией, либо используют внешнюю коррекцию схемы (т.е. внешние цепи соответствующим образом изменяющие ее АЧХ).

Интегратор на основе ОУ

Схема строится на основе усилителя на рисунке 5, а и имеет вид, показанный на рисунке 10.

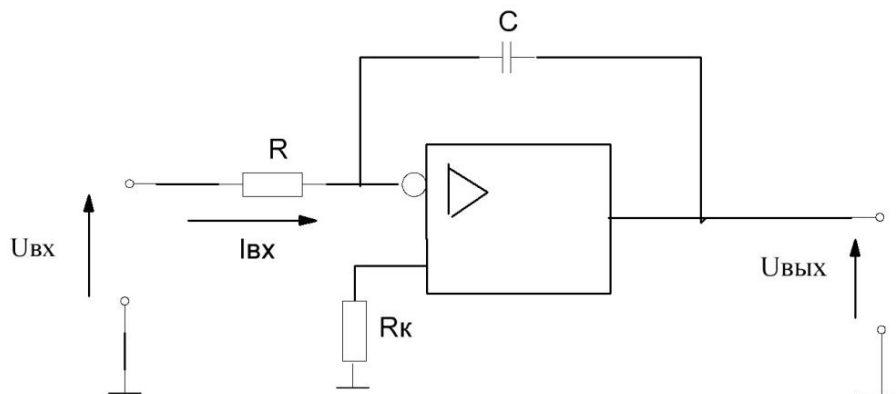


Рисунок 10

Выходное напряжение:

$$U_{\text{вых}}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t (U_{\text{вх}}(t)) dt = \frac{1}{\tau} \int_0^t (U_{\text{вх}}(t)) dt,$$

где $\tau = RC$ – постоянная интегрирования.

Коэффициент передачи устройства в комплексной форме равен

$$K(j\omega) \approx -\frac{1}{j\omega RC} = -\frac{1}{j\omega\tau}.$$

Реальная ЛАЧХ интегратора имеет вид, показанный на рисунке 11.

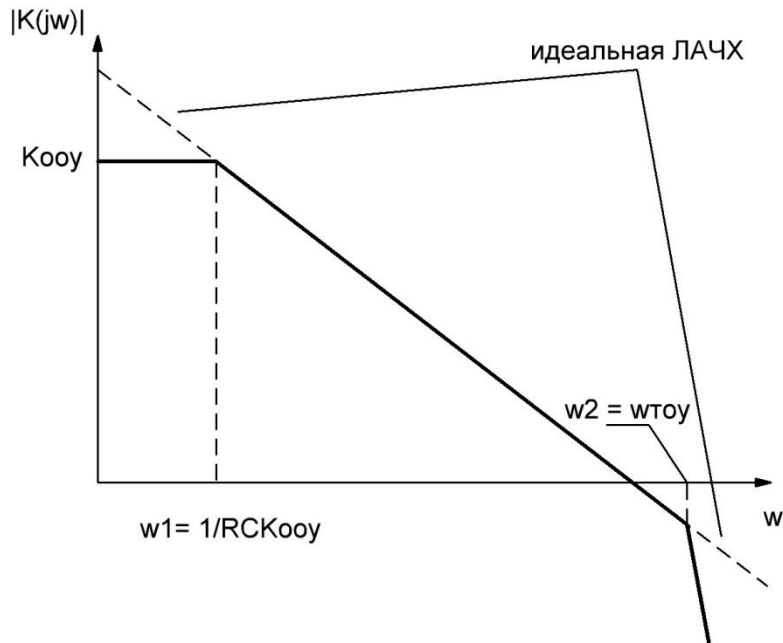


Рисунок 11

Значение ω_1 соответствует частоте, на которой

$$|K(j\omega)| \approx |1/\beta(j\omega)| = K_{0ou}.$$

При дальнейшем уменьшении частоты входного сигнала петлевое усиление становится меньше 1 и точность интегрирования резко падает. Аналогичное происходит и при $\omega > \omega_2 = \omega_{тоу}$. Анализируя ЛАЧХ интегратора с разомкнутой ОС, можно показать, что при использовании ОУ с полной внутренней коррекцией схема абсолютно устойчива. Точность интегрирования зависит от коэффициента усиления ОУ (глубины ОС).

Дифференциатор на основе ОУ

Схема приведена на рисунке 12.

Если бы в схеме отсутствовало $R_{корр}$, то зависимость $U_{вых} = f(U_{вх})$ имела бы следующий вид:

$$U_{вых}(t) = -RC \frac{dU_{вх}(t)}{dt} = \tau \frac{dU_{вх}(t)}{dt},$$

где $\tau = RC$ – постоянная дифференцирования.

Коэффициент передачи в этом случае равен:

$$K(j\omega) = \frac{R}{j\omega C} = j\omega RC = j\omega\tau.$$

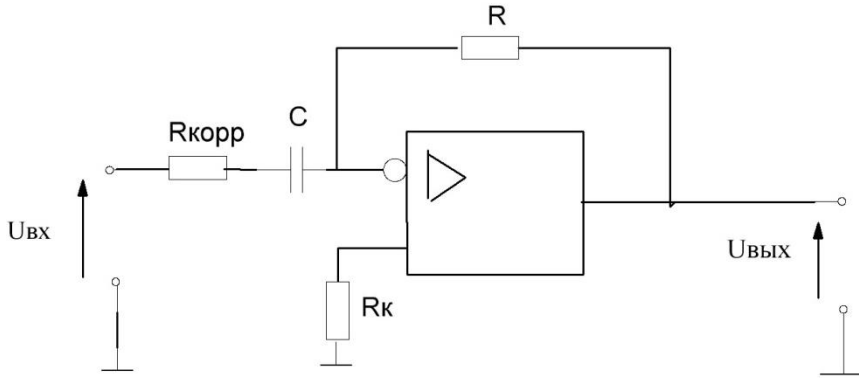


Рисунок 12

Но такая схема на практике неработоспособна. С одной стороны, из-за большого коэффициента усиления на высоких частотах резко усиливается уровень шума на выходе, который будет «забивать» его (проявление нелинейности). С другой – сдвиг фаз в цепи ОС близок к -90° . В свою очередь даже полностью скорректированный ОУ на высоких частотах также сдвинет фазу входного сигнала на -90° . В результате общий сдвиг фаз по кольцу ОС составит величину, близкую к 180° , и схема будет иметь недопустимо малый запас устойчивости. Для предотвращения этого явления в схему вводят $R_{корр}$, придающее на высоких частотах обратной связи резистивный характер и тем самым ограничивающее рост коэффициента усиления и обеспечивающее необходимый запас устойчивости. ЛАЧХ дифференциатора с $R_{корр}$ приведена на рисунке 13.

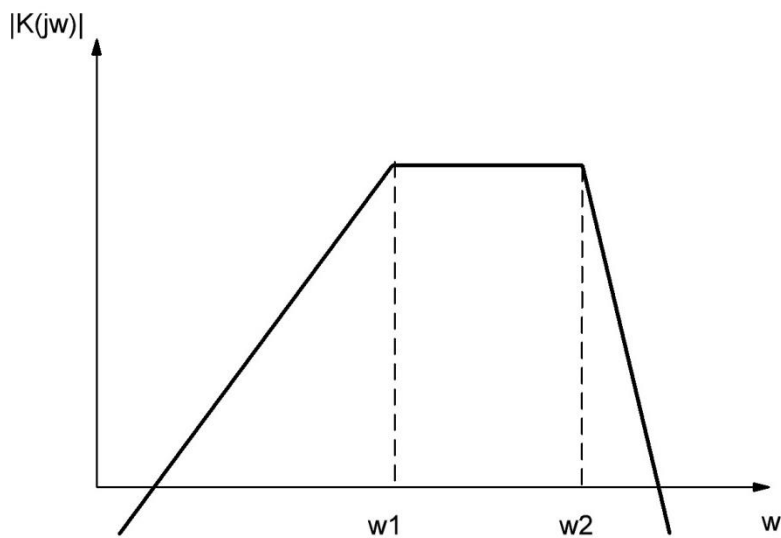


Рисунок 13

$$\text{Здесь } \omega_1 = \frac{1}{R_{\text{корр}}C}.$$

Величина ω_2 определяется частотой, на которой петлевое усиление схемы становится равным 1 из-за падения $|K_{\text{оу}}(j\omega)|$.

Описание лабораторного макета

Лабораторный макет универсален и позволяет посредством коммутации тумблеров собирать на основе ОУ схемы, выполняющие различные функции. Электрическая принципиальная схема макета приведена на рисунке 14.

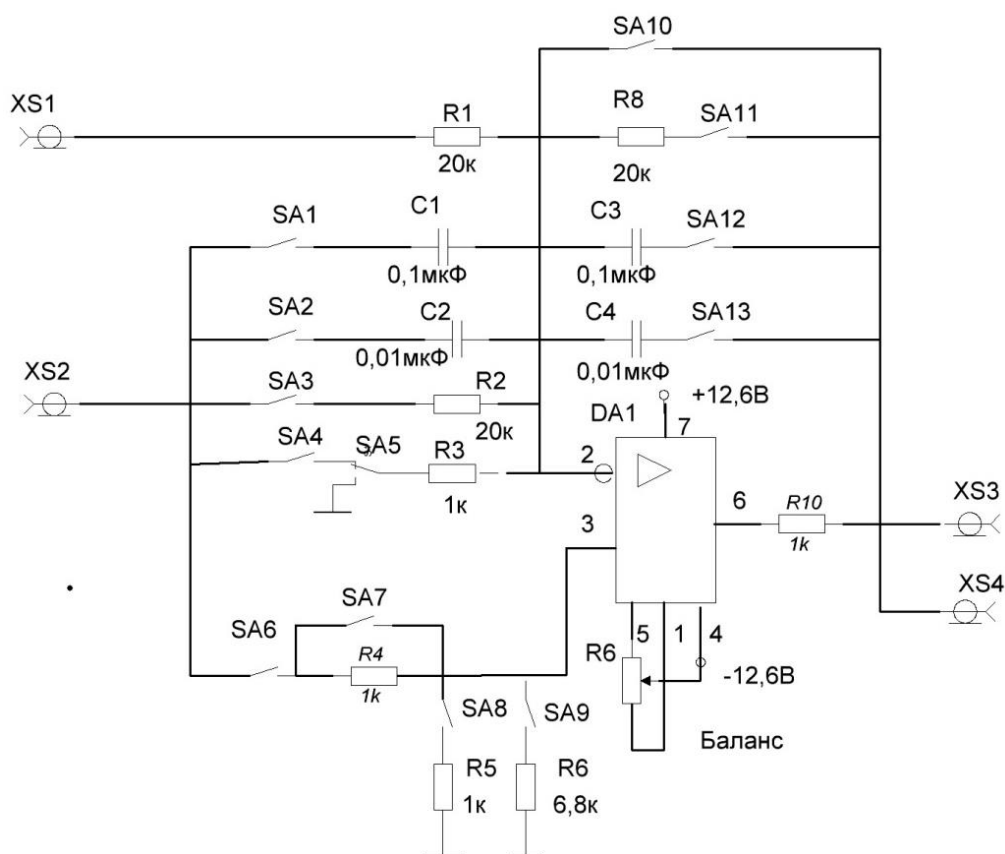


Рисунок 14

Порядок выполнения работы

1. Исследование инвертирующего ОУ.
- 1.1. Измерение входного сопротивления усилителя.

1.1.1. Включите лабораторную установку и контрольно-измерительную аппаратуру.

1.1.2. С помощью соответствующих переключателей соберите схему, показанную на рисунке 6, где $R1 = 1 \text{ кОм}$, $R2 = 20 \text{ кОм}$, $R5 = 1 \text{ кОм}$.

1.1.3. Отбалансируйте схему при $U_{вх} = 0$ с помощью резистора $R6$.

1.1.4. Подайте на вход устройства через отградуированное резистивное сопротивление (магазин сопротивлений) синусоидальный сигнал уровнем $10 \pm 2 \text{ мВ}$ частотой 1 кГц .

1.1.5. Добейтесь посредством изменения сопротивления (магазина сопротивлений) того, чтобы уровень сигнала на входе схемы был равен половине уровня сигнала генератора. Полученное при этом значение отградуированного сопротивления (магазина сопротивлений) будет равно входному.

1.2. Измерение выходного сопротивления.

1.2.1. Подайте на вход устройства через отградуированное резистивное сопротивление (магазин сопротивлений) синусоидальный сигнал уровнем $10 \pm 2 \text{ мВ}$ частотой 1 кГц .

1.2.2. Подключите к выходу отградуированное резистивное сопротивление (магазин сопротивлений) и подберите его величину так, чтобы уровень сигнала на выходе стал в два раза меньше, чем при отключенном сопротивлении. Полученное при этом значение сопротивления будет равно выходному.

1.3. Снятие и построение амплитудной характеристики устройства.

1.3.1. Подайте на вход схемы синусоидальный сигнал частотой 1 кГц и уровнем $100 \pm 50 \text{ мВ}$ и плавно увеличивайте его до значения, при котором выходной сигнал заметно исказится.

1.3.2. Увеличьте входной сигнал еще на 6 дБ (в 2 раза по напряжению) и запишите измеренные значения входного и выходного уровней.

1.3.3. Последовательно уменьшая уровень входного сигнала через 3 дБ (в 1,4 раза по напряжению), снимите зависимость уровня выходного сигнала от уровня входного. Измерение прекратите, когда уровень входного сигнала упадет на 18 дБ относительно установленного в п. 1.3.2.

1.4. Снятие и построение амплитудно-частотной характеристики устройства.

1.4.1. Подайте на вход схемы синусоидальный сигнал уровнем $10 \pm 2 \text{ мВ}$ и, плавно изменяя частоту в рабочем диапазоне, найдите частоты, при которых коэффициент передачи падает до $0,9$; $0,8$; $0,7$; $0,6$; $0,5$ от максимального.

Измерьте максимальный коэффициент передачи на частоте 1 кГц. При построении АЧХ необходимо пользоваться логарифмическим масштабом.

1.5. Исследование сумматора напряжений.

1.5.1. Соберите схему, соответствующую рисунку 7 при условиях $R_1 = R_2 = R_{ос} = 20 \text{ кОм}$, и убедитесь в правильности ее функционирования.

2. Исследование неинвертирующего ОУ.

2.1. Соберите схему, показанную на рисунке 8 при условиях $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 20 \text{ кОм}$.

2.2. Повторите измерения по п.п. 1.1.4; 1.1.5; 1.2; 1.3; 1.4.

3. Исследование дифференциального ОУ.

3.1. Соберите схему, показанную на рисунке 9 при условиях $R_1 = R_2 = 20 \text{ кОм}$, $R_3 = R_4 = 1 \text{ кОм}$, и убедитесь в правильности ее функционирования.

4. Исследование интегратора на ОУ.

4.1. Соберите схему, соответствующую рисунку 10 при условиях $R = 20 \text{ кОм}$, $C = 0,01 \text{ мкФ}$.

4.2. Подайте на вход схемы синусоидальный сигнал уровнем $50 \pm 20 \text{ мВ}$ и частотой, при которой выходной сигнал начинает искажаться (ограничиваться). Последовательно увеличивая частоту в 2 раза, снимите АЧХ интегратора. Измерения прекратите, когда уровень выходного сигнала упадет до величины меньше 50 мВ.

4.3. Подайте на вход интегратора последовательность прямоугольных импульсов без постоянной составляющей уровнем 10.2 В и скважностью, лежащей в пределах 2–4, и подберите их длительность так, чтобы размах интегрированного сигнала составлял $2 \pm 0,5 \text{ В}$. Зарисуйте и объясните осциллограммы.

4.4. Измените величину C с 0,01 до 0,1 мкФ и проделайте п.п. 4.2 и 4.3. Сравните полученные результаты.

5. Исследование дифференциатора на ОУ.

5.1. Соберите схему, соответствующую рисунку 12, при условиях $R = 20 \text{ кОм}$, $C = 0,01 \text{ мкФ}$.

5.2. Подайте на вход схемы синусоидальный сигнал уровнем $50 \pm 20 \text{ мВ}$ и частотой, при которой на выходе становится заметным ограничение сигнала. Последовательно уменьшая частоту в 2 раза, снимите АЧХ дифференциатора. Измерения прекратите, когда уровень выходного сигнала упадет до величины меньше 50 мВ.

5.3. Подайте на вход дифференциатора последовательность прямоугольных импульсов со скважностью, близкой к 2, и уровнем, при котором выходной сигнал не ограничен, а его амплитуда больше 2 В. Частота импульсов должна быть такой, чтобы длительность дифференцированного импульса составляла не более 0,1 длительности входного. Зарисуйте и объясните осциллограммы.

5.4. Измените величину C от 0,01 до 0,1 мкФ и выполните п.п. 5.2; 4.5.3. Сравните полученные результаты.

6. Содержание отчета:

- Таблицы измерений.
- Графики снятых зависимостей и осциллограмм.
- Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте назначение, параметры, характеристики и особенности применения ОУ.
2. Приведите схемы инвертирующего, неинвертирующего и дифференциального включения ОУ, охарактеризуйте их основные параметры и сравните их между собой.
3. Охарактеризуйте неинвертирующий и инвертирующий повторители напряжения и приведите их схемную реализацию.
4. Нарисуйте схему сумматора напряжений и охарактеризуйте особенности сумматора.
5. Приведите схемы дифференцирующего и интегрирующего ОУ и охарактеризуйте их параметры.
6. Нарисуйте реальные АЧХ масштабных усилителей, дифференциатора и интегратора на ОУ.
7. Поясните особенности обеспечения устойчивости масштабных дифференцирующих и интегрирующих усилителей при применении в них ОУ с полной внутренней коррекцией и без нее.

Лабораторная работа 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ В УСИЛИТЕЛЯХ

Цель работы: исследование влияния отрицательной обратной связи на характеристики и параметры усилителей.

Краткие сведения из теории

Обратная связь (ОС) – это передача с выхода усилительного устройства (УУ) части усиленного сигнала на его вход. В общем случае структурная схема УУ с ОС имеет вид, показанный на рисунке 1.



Рисунок 1

Здесь $X(j\omega)$ – входной сигнал; $Y(j\omega)$ – выходной сигнал; $Z_{oc}(j\omega)$ – сигнал обратной связи; $e(j\omega)$ – сигнал, равный сумме (разности) сигналов обратной связи и входного сигнала. Знак «-» означает, что сигнал $Z_{oc}(j\omega)$ поступает на вход сумматора проинвертированным. В качестве $X(j\omega)$, $Y(j\omega)$, $Z_{oc}(j\omega)$, $e(j\omega)$ могут выступать либо токи, либо напряжения в соответствующих типах схем. Коэффициент передачи такого устройства определяется следующим образом:

$$K^*(j\omega) = Y(j\omega) / X(j\omega).$$

Если все входящие в формулу величины действительны, то можно записать:

$$K^* = K / (1 + \beta K).$$

В этом случае если βK – положительна, т.е. сигнал обратной связи вычитается из входного, то обратная связь называется отрицательной (ООС). В противном случае обратная связь положительна (ПОС). Величина βK называется петлевым усилением, а $F = 1 + \beta K$ – глубиной обратной связи. В реальных устройствах K и β величины комплексные, фаза сигнала ОС зависит от частоты и ООС в одном диапазоне частот может перейти в ПОС в другом.

Наиболее типичным примером применения ПОС является построение автогенераторов; генерация в схеме возникает при $\beta K \leq -1$.

Область и цели применения ООС более разнообразны и вытекают из следующих ее свойств. При $|\beta(j\omega)| |K(j\omega)| \gg 1$ (глубокой ООС), характеристики устройства с обратной связью определяются, в основном, величиной $\beta(j\omega)$ (для параметров УУ при этом очень мала). Используя это, можно на основе одного и того же УУ, изменяя только характеристики $\beta(j\omega)$, получить целый ряд устройств, выполняющих различные преобразования входного сигнала. Они могут быть линейными (при линейной ОС), так и нелинейными (при нелинейной ОС).

В зависимости от особенностей подключения четырехполюсника обратной связи выделяют следующие типы ОС:

- последовательная по току (рисунок 2);
- параллельная по току (рисунок 3);
- последовательная по напряжению (рисунок 4);
- параллельная по напряжению (рисунок 5).

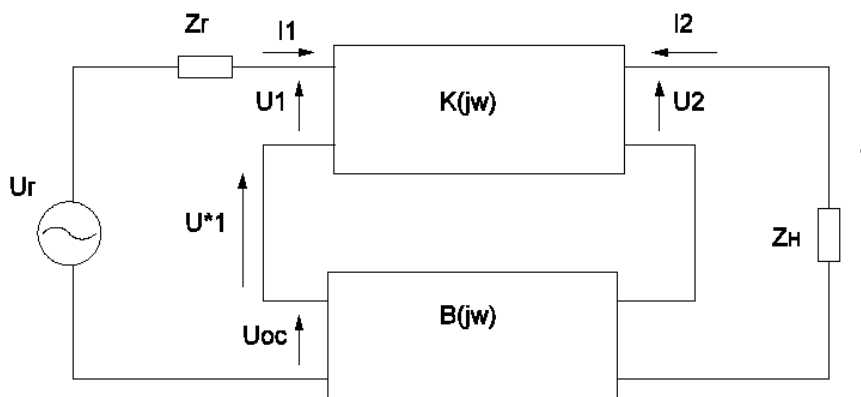


Рисунок 2

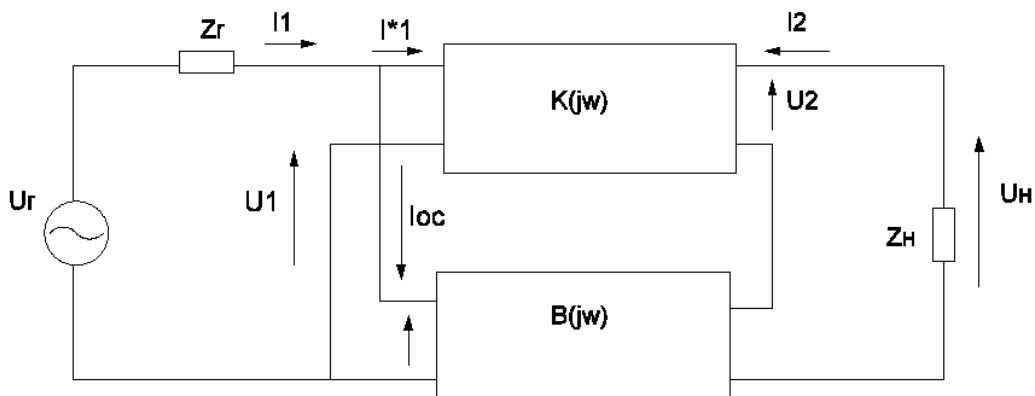


Рисунок 3

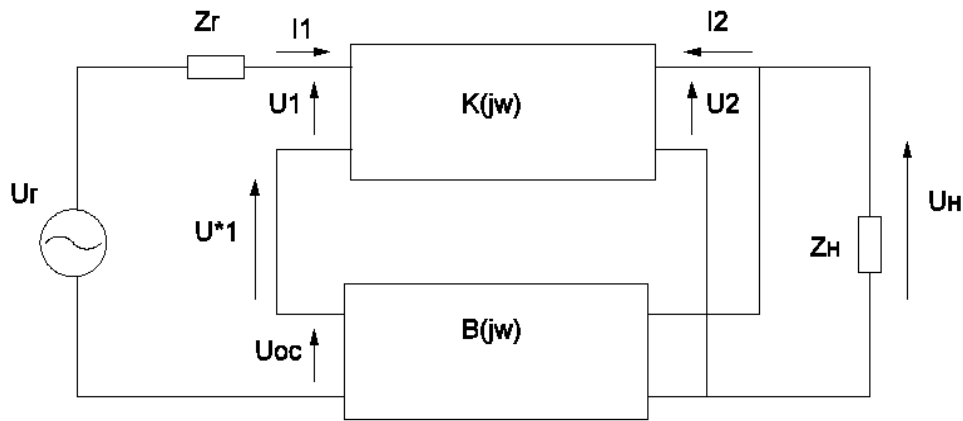


Рисунок 4

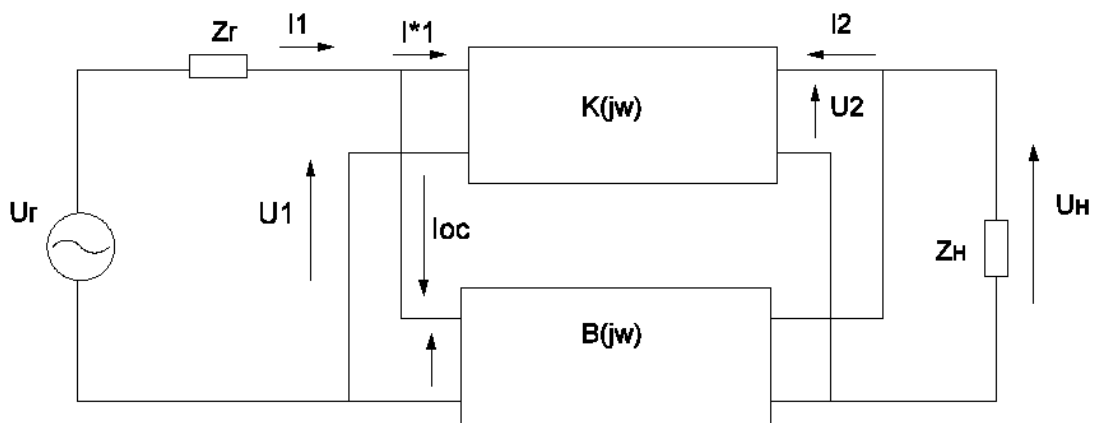


Рисунок 5

Звездочка в обозначении напряжений и токов свидетельствует, что данная величина оценивается при наличии обратной связи. Очевидно, что последовательная ОС увеличивает входное сопротивление и уменьшает коэффициент передачи устройства по напряжению, т.к. при одном и том же входном токе I_1 входное U^{*1} больше U_1 на величину U_{oc} . По аналогичным причинам параллельная ОС уменьшает входное сопротивление и коэффициент передачи по току устройства. Определение «связь по току» характеризует то, что сигнал обратной связи пропорционален выходному току (току нагрузки усилителя). В связи с этим всякие его изменения при постоянном входном сигнале вызывают изменения сигнала ОС, которые, усиливаясь в УУ, корректируют выходное напряжение таким образом, чтобы поддержать выходной ток постоянным. Таким образом, обратная связь по току стабилизирует выходной ток устройства, увеличивает его выходное сопротивление. Аналогично можно показать, что обратная связь по напряжению уменьшает

выходное сопротивление усилителя. Степень изменения соответствующих коэффициентов передачи и сопротивлений пропорциональна глубине обратной связи. Кроме этого, введение ООС в УУ вызывает следующие эффекты, степень проявления которых также пропорциональна глубине обратной связи:

- расширение полосы пропускания устройства в случае резистивного характера β ;
- линейризацию амплитудной характеристики УУ, увеличение его динамического диапазона;
- уменьшение нелинейных искажений и шумов на выходе УУ. Степень этого уменьшения определяется, кроме глубины ОС, местом возникновения, т.е. чем ближе источник искажений или шумов к выходу устройства, тем больше степень подавления;
- уменьшение влияния изменения параметров УУ на коэффициент передачи в целом.

Применение частотно-зависимой обратной связи позволяет строить усилительные устройства с требуемой АЧХ, например, корректирующие усилители, активные фильтры и т.д. В случае если УУ состоит из нескольких каскадов, в нем может быть несколько цепей обратной связи. Если ОС охватывает только определенные каскады или части УУ, то она называется местной. В случае передачи сигнала с выхода на вход всего усилителя ОС называется общей. Различают также ОС по постоянному (когда сигнал ОС пропорционален постоянной или медленно изменяющейся составляющей выходного сигнала) и переменному (когда сигнал ОС пропорционален переменной составляющей) току.

При введении в УУ ООС необходимо учитывать изменение ее характера на краях рабочего диапазона частот, т.к. оно может вызвать в лучшем случае изменение АЧХ устройства, а в худшем его самовозбуждение.

Описание лабораторного макета

Лабораторный макет универсален и позволяет исследовать УУ без ООС, с местными параллельной ОС по напряжению и последовательной ООС по току, а также общей последовательной ООС по напряжению, которая может быть частотно-независимой, низкочастотной и высокочастотной. Схема пульта приведена на рисунке 6.

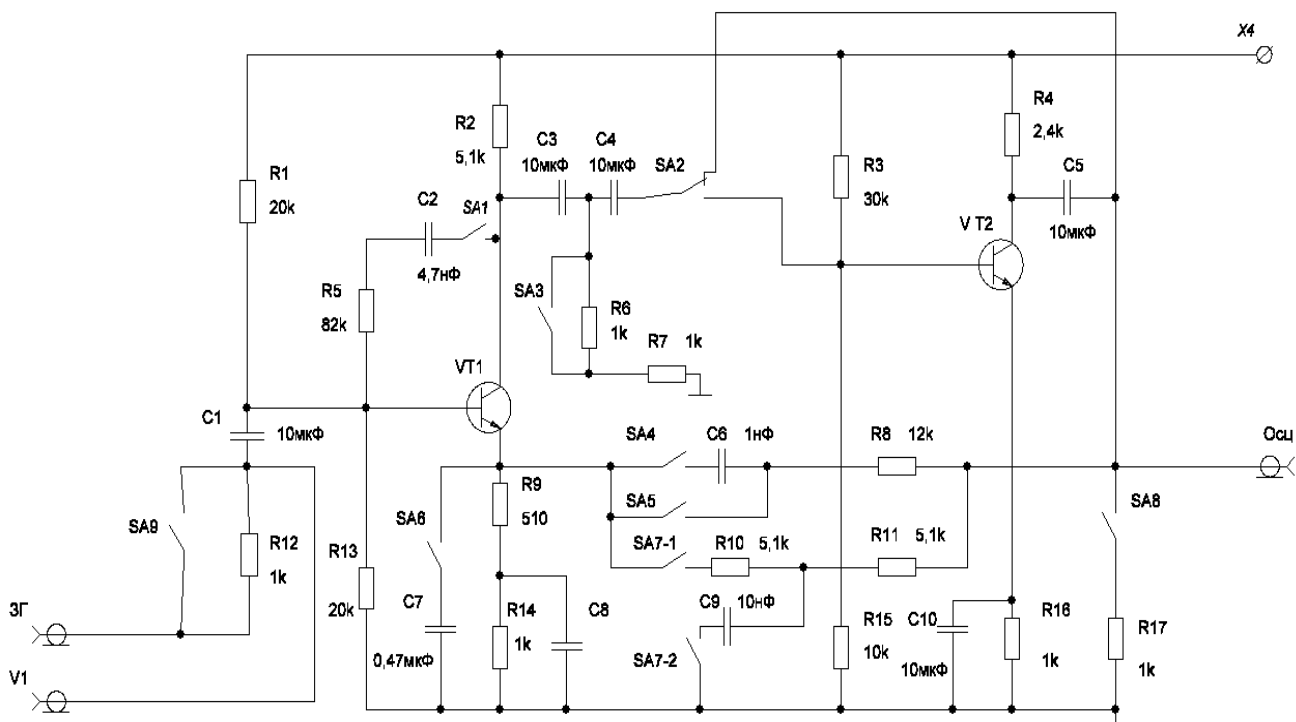


Рисунок 6

Назначение переключателей:

SA1 – в замкнутом состоянии – ввод местной параллельной ООС по напряжению в первом каскаде (VT1);

SA2 – подключение измерительных приборов к выходу первого (верхнее положение) или второго (нижнее положение) каскада;

SA3 – изменение сопротивления нагрузки первого каскада;

SA4 – в замкнутом состоянии – ввод общей последовательной высокочастотной ООС по напряжению;

SA5 – в замкнутом состоянии – ввод общей последовательной частотно-независимой ООС по напряжению;

SA6 – в разомкнутом состоянии ввод местной последовательной частотно-независимой ООС по току;

SA7 (SA7-1, SA7-2) – в замкнутом положении – ввод общей последовательной низкочастотной ООС по напряжению;

SA8 – в замкнутом положении – подключение нагрузки второго (на VT2) каскада;

SA9 – в замкнутом состоянии – закорачивание резистора, включенного между входом каскада и выходом задающего генератора.

Порядок выполнения работы

1. Измерение входного сопротивления $R_{вх}$ каскада.

1.1. Включите лабораторную установку и контрольно-измерительную аппаратуру.

1.2. Соберите схему усилительного каскада с ОЭ на VT1 без ООС и отключенном SA3 и подайте на ее вход через отградуированное резистивное сопротивление (магазин сопротивлений) синусоидальный сигнал частотой 1 кГц и уровнем 10 ± 2 мВ.

1.3. Добейтесь посредством изменения величины сопротивления (магазина сопротивлений) того, чтобы уровень сигнала на входе каскада был равен половине уровня выходного сигнала генератора. Полученное при этом значение отградуированного сопротивления (магазина сопротивлений) будет равно входному.

1.4. Проведите аналогичные измерения, вводя последовательно в каскад местные параллельную ООС по напряжению и последовательную ООС по току.

2. Измерение выходного сопротивления $R_{вых}$ каскада.

2.1. Соберите схему усилительного каскада с ОЭ без ООС на VT1 с отключенным R17 и подайте на вход синусоидальный сигнал частотой 1 кГц и уровнем 10 ± 2 мВ и измерьте уровень сигнала на выходе.

2.2. Подключите к выходу отградуированное резистивное сопротивление (магазин сопротивлений) и подберите его величину так, чтобы уровень сигнала на выходе стал в два раза меньше, чем при отключенном сопротивлении. Полученное при этом значение сопротивления будет равно выходному.

2.3. Выполните п. 1.4.

3. Измерение коэффициентов передачи по напряжению K_u , по току K_i , по мощности K_p каскада.

3.1. Выполните п. 2.1.

3.2. Найдите коэффициент усиления каскада по напряжению как отношение уровней выходного $U_{вых}$ и входного $U_{вх}$ сигналов.

3.3. Определите коэффициент передачи каскада по току и мощности.

3.4. Выполните п. 1.4.

4. Снятие и построение амплитудной характеристики каскада.

4.1. Выполните п. 2.1.

4.2. Плавно увеличьте уровень входного сигнала до величины, при которой выходной сигнал заметно исказится.

4.3. Поднимите уровень входного сигнала еще на 6 дБ (в 2 раза по напряжению) и запишите измеренные уровни входного и выходного сигналов.

4.4. Последовательно уменьшая уровень входного сигнала через 3 дБ (1,4 раза по напряжению), снимите амплитудную характеристику каскада. Измерения прекратите, когда уровень входного сигнала упадет на 18дБ относительно установленного в п. 4.3.

4.5. Выполните п. 1.4.

5. Снятие и построение АЧХ двухкаскадного усилителя.

5.1. Соберите двухкаскадный усилитель на VT и VT2 с отключенными местными обратными связями в первом каскаде, а также отключенной общей обратной связью. Подключите нагрузку R17.

5.2. Подайте на вход усилителя синусоидальный сигнал частотой 1 кГц и уровнем, при котором выходной сигнал равен 100 ± 20 мВ.

5.3. Последовательно увеличивая частоту генератора на октаву (в 2 раза), снимите зависимость коэффициента передачи усилителя от частоты. Проведите аналогичные измерения при уменьшении частоты относительно 1кГц. При построении АЧХ пользуйтесь логарифмическим масштабом.

5.4. Проведите аналогичные измерения последовательно вводя в усилитель частотно-независимую ООС, низкочастотную ООС, высокочастотную ООС.

6. Определение относительной нестабильности коэффициента передачи усилителя.

6.1. Выполните п.п. 5.1 и 5.2.

6.2. Измерьте коэффициент передачи по напряжению

– при отключенном тумблере SA3 ($Ku1$);

– при включенном тумблере SA3 ($Ku2$).

Рассчитайте нестабильность коэффициента передачи по формуле

$$\Delta(\%) = (|Ku1 - Ku2|) / Ku1 \cdot 100\%.$$

6.3. Введите в каскад частотно-независимую ООС и повторите измерения согласно п. 6.2. Сравните полученные результаты.

7. Содержание отчета:

– Таблицы измерений.

– Результаты расчетов.

– Графики снятых зависимостей.

– Выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы и назначение всех элементов лабораторного макета.
2. Поясните влияние на входное и выходное сопротивления каскада различных видов ООС.
3. Поясните влияние различных видов ООС на коэффициенты передачи каскада по току, напряжению и мощности.
4. Как влияет ООС на амплитудную характеристику устройства?
5. Поясните влияние ООС на АЧХ усилителя.
6. Почему величина подавления помех в усилительном устройстве с ООС зависит от места их возникновения?
7. Поясните, каким образом в исследуемом устройстве организовывались различные виды ООС.
8. Объясните влияние ООС на нестабильность коэффициента передачи усилительного устройства.
9. В чем отличие общих и местных ООС?
10. Что такое положительная и отрицательная обратные связи?
11. Почему в устройстве с ООС возможно возникновение самовозбуждения? При каких условиях это может произойти?
12. Как определить коэффициент передачи устройства с глубокой ООС?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Войшвилло Г.В. Усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1983. – 264 с.
2. Ногин В.Н. Аналоговые электронные устройства. – М.: Радио и связь, 1982. – 304 с.
3. Остапенко Г.С. Усилительные устройства. – М.: Радио и связь, 1989. – 400 с.
4. Богданович Б.М. Проектирование усилительных устройств на интегральных микросхемах: учеб. пособие. – Минск: Высш. шк. 1980. – 208 с.

Дополнительная

5. Достал И. Операционные усилители: [пер. с англ.]. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
6. Джонс, М. Х. Электроника: практический курс: [пер. с англ.]. – М.: Постмаркет, 1999. – 528 с.
7. Гомоюнов К.К. Транзисторные цепи: учеб. пособие для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 240 с.

Электронный ресурс

8. Красько А.С. Схемотехника аналоговых электронных устройств [Электронный ресурс]: учеб. пособие. – 2005. – URL: <http://litrus.net/book/read/107389?p=1> (дата обращения: 20.03. 2015).
9. Петин Г.П . Аналоговая схемотехника [Электронный ресурс]. – Ростов на/Д. – 2010. – URL: [http://phys.rsu.ru>web/petin/analog.pdf](http://phys.rsu.ru/web/petin/analog.pdf) (дата обращения 20.03.2015).