

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
Северо-Кавказский филиал
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
"Московский технический университет связи и информатики"



Методические указания
к лабораторным работам

СХЕМОТЕХНИКА

Направление подготовки:

09.03.01 Информатика и вычислительная техника

11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи

Профиль: Многоканальные телекоммуникационные системы

Сети связи и системы коммутации

Защищенные системы и сети связи

Системы радиосвязи и радиодоступа

Вычислительные машины, комплексы, системы и сети

Программное обеспечение и интеллектуальные системы

Ростов-на-Дону
2019

УДК 681.3.06 (076)

ББК 32.07

Львов В.Л., Чикалов А.Н. Схемотехника. Методические указания к лабораторным работам. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ, 2019. - 58 с.

В пособии изложены методические рекомендации, содержательные материалы и контрольные задания для проведения лабораторных работ по освоению основ аналоговой схемотехники, использованию аналоговых устройств в различных системах. Пособие содержит необходимые справочные материалы.

Методические указания предназначены для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 09.03.01 Информатика и вычислительная техника и 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи, профилей Многоканальные телекоммуникационные системы, Сети связи и системы коммутации, Защищенные системы и сети связи, Системы радиосвязи и радиодоступа, Вычислительные машины, комплексы, системы и сети, Программное обеспечение и интеллектуальные системы.

Пособие предназначено для использования при изучении дисциплин Схемотехника, Схемотехника телекоммуникационных устройств, а также может быть использовано преподавателями и студентами при изучении родственных дисциплин и в процессе самостоятельной работы.

Учебное пособие обсуждено и одобрено на заседании кафедры ИВТ.
Протокол №1 от 26.08.2019

Рецензент Зав. кафедрой ИВТ д.т.н. профессор Соколов С.В.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Анализ усилительного каскада с RC-связями	4
1.1. Исследование влияния элементов схемы на амплитудную характеристику усилителя	13
1.2. Анализ влияния элементов схемы на амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристику	15
1.3. Анализ влияние элементов схемы усилителя на АЧХ и ФЧХ усиления с помощью измерителя диаграмм Боде	15
1.4. Анализ влияния элементов схемы на переходную характеристику (ПХ) усилительного каскада	17
2. Исследование интегральных коммутаторов	20
2.1. Исследование интегрального коммутатора на лабораторном стенде	24
2.2. Исследование интегрального коммутатора с помощью компьютерного моделирования	25
3. Исследование аналоговых устройств на основе операционных усилителей	27
3.1. Исследование схемы инвертирующего усилителя на лабораторном стенде	31
3.2. Исследование схемы интегратора на лабораторном стенде. . .	34
3.3. Исследование схемы дифференциатора на лабораторном стенде	34
3.4. Исследование схемы генератора на лабораторном стенде	35
3.5. Компьютерное моделирование схем на основе операционных усилителей	36
4. Исследование интегральных компараторов напряжения	41
4.1. Исследование аналогового компаратора на лабораторном стенде.	47
4.2. Исследование схемы компаратора с опорным напряжением с помощью компьютерного моделирования	49
4.3. Исследование схемы компаратора с гистерезисом с помощью компьютерного моделирования	50
5. Анализ устройств на основе логических интегральных микросхем . . .	52
5.1. Исследование работы комбинационной схемы	54
5.2. Исследование генератора импульсов на логических элементах	55
5.3. Исследовать генератор импульсов на ЛЭ с помощью компьютерного моделирования	56
5.4. Исследование формирователя импульсов на ЛЭ	57
5.5. Исследование формирователя импульсов на ЛЭ с помощью компьютерного моделирования	58

1. АНАЛИЗ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА С RC-СВЯЗЯМИ

Цель

1. Изучить принцип работы усилительного каскада на биполярном транзисторе с RC связями;
2. Получить навыки анализа влияния элементов принципиальной схемы на его частотные и временные характеристики.

Учебные вопросы

- 1.1. Исследование влияния элементов схемы на амплитудную характеристику усилителя;
- 1.2. Анализ влияния элементов схемы на амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристику;
- 1.3. Анализ влияние элементов схемы усилителя на АЧХ и ФЧХ усиления с помощью измерителя диаграмм Боде;
- 1.4. Анализ влияния элементов схемы на переходную характеристику (ПХ) усилительного каскада.

Литература для подготовки к занятию

1. Соколов С.В., Титов Е.В. Основы схемотехники. Ростов н/Д.: СКФ МТУСИ, 2010. – 210с.
2. Павлов В. Н, Ногин В. Н., Схемотехника аналоговых электронных устройств. Для высших учебных заведений. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 320с.
3. Петин Г.П., Аналоговая схемотехника. - Ростов-на/Д.: ЮФУ , 2010. - 314с.
4. Алиев И. И., Виртуальная электротехника. Компьютерные технологии в электротехнике и электронике. М.: РадиоСофт, 2003. – 240с.
5. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench / Под ред. Д.И.Панфилова. - М.: Додэка, 1999.
6. Кардашев Г.А. Цифровая электроника на персональном компьютере / Г.А.Кардашев. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 311 с. : ил. (Массовая радиобиблиотека; 1263)

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. По каждому из заданий должны быть представлены название задания и те конкретные данные, которые указаны в задании.

Актуальность занятия

При решении многих технических задач возникает необходимость в усилении слабых электрических сигналов. Это осуществляется электронными усилителями. Кроме того, большинство остальных устройств также строятся на основе усилителей с дополнительными связями.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Назначение и область применения усилителя.
2. Как классифицируются усилители?
4. Назовите основные характеристики и параметры усилителя?
5. Какие режимы работы транзистора бывают? В чем между ними отличия?
6. В чем отличие поведения усилителя на нижних и верхних частотах входного сигнала?

Краткие сведения из теории

Усилителем электрических сигналов называют устройство, в котором сравнительно маломощный электрический сигнал управляет передачей гораздо большей энергией от источника питания в нагрузку. Структурная схема замещения усилителя приведена на рис.1.1.

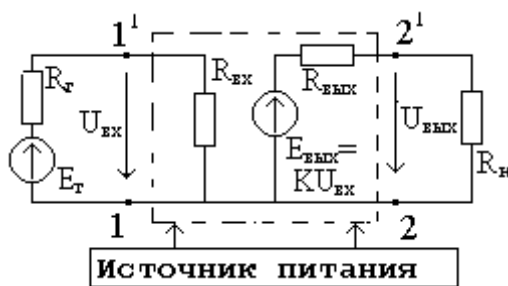


Рис.1.1. Схема замещения усилителя

К входу усилителя подключен источник сигнала с действующим значением ЭДС E_T и внутренним сопротивлением R_T . Он создает на выходе усилителя напряжение $U_{ВХ}$. К выходу усилителя подключена нагрузка с сопротивлением R_H . Усилитель, управляемый входным сигналом, преобразует энергию источника питания и создает в выходной цепи на

нагрузке усиленный сигнал $U_{ВЫХ}$, что отражено на схеме наличием источника напряжения $KU_{ВХ}$ с выходным сопротивлением $R_{ВЫХ}$. $K=U_{ВЫХ}/U_{ВХ}$ – коэффициент усиления по напряжению.

Усилитель представляет собой многокаскадное устройство, состоящее из ряда последовательно соединенных простейших каскадов. Схема одного из усилительных каскадов выполненного на биполярном транзисторе с RC-связями приведена на рис.1.2. Такой усилитель обычно предназначен для предварительного усиления непрерывных или импульсных сигналов по напряжению. Резистивно-емкостная (RC) связь между усилителем и источником сигнала и нагрузкой является наиболее распространенной.

Основными элементами каскада являются: источник питания (E_K), биполярный транзистор n-p-n типа ($VT1$) и резистор коллекторной цепи R_K . Эти элементы образуют основную усилительную цепь, в которой за счет протекания управляемого током базы I_B коллекторного тока $I_K = \beta \cdot I_B$, на коллекторе транзистора создается усиленное переменное напряжение $U_{КЭ} = E_K - I_K R_K$, которое, далее, через разделительный конденсатор C_{P2} передается на нагрузочное сопротивление R_H .

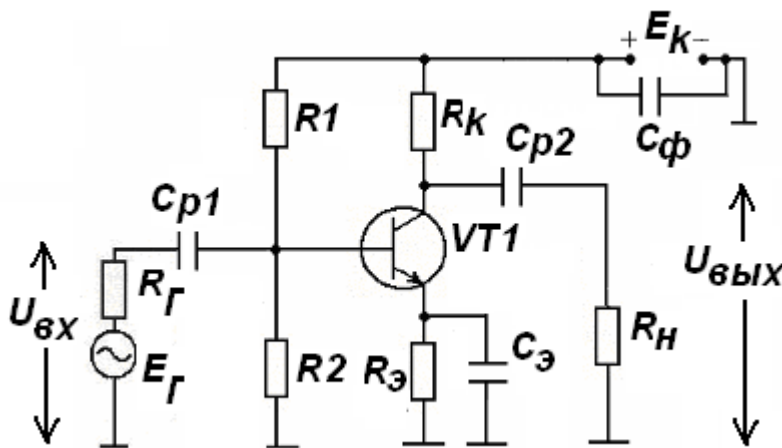


Рис.1.2. Схема усилителя

Резисторы R_1 , R_2 , $R_Э$ играют вспомогательную роль. R_1 , R_2 обеспечивают необходимый режим транзистора по постоянному току (режим покоя, рабочую точку транзистора).

Кроме того, за счет включения в эмиттерную цепь резистора $R_Э$, в схеме возникает отрицательная

обратная связь по постоянному току. Она осуществляет температурную стабилизацию рабочей точки транзистора. Полярность напряжения источника питания E_k положительна. Это обеспечивает для транзистора n-p-n типа смещение коллекторного перехода в обратном, а эмиттерного перехода в прямом направлении, т.е. активный (усилительный) режим работы транзистора.

Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} называются разделительными. Они обеспечивают изоляцию (разделение) источника сигнала и нагрузки от самого каскада по постоянному току и соединение (связь) их по переменной составляющей между собой.

Для устранения отрицательной обратной связи по переменной составляющей, которая возникает из-за эмиттерного резистора $R_Э$ его шунтируют конденсатором $C_Э$, сопротивление $X_{C_Э}$ которого на низшей частоте усиливаемого сигнала должно быть на порядок меньше $R_Э$ ($R_Э \gg X_{C_Э}$). Это ослабляет (устраняет) отрицательную обратную связь в каскаде по переменному току и устраняет влияние $R_Э$ на коэффициент усиления по переменной составляющей.

Кроме перечисленных элементов принципиальной схемы, при усилении импульсных или высокочастотных сигналов, необходимо учитывать паразитную емкость $C_0 = C_{кэ} + C_M + C_{сл.каскада}$, состоящую из 3-х составляющих: $C_{кэ}$ – емкость коллектор-эмиттер транзистора; C_M – емкость монтажа; $C_{сл.каскада}$ – включенная параллельно нагрузке входная емкость следующего каскада, или прибора подключаемого к усилителю, например, осциллографа.

Идеальный усилитель должен увеличивать входной сигнал в заданное число раз (K_U) без изменения формы сигнала. В реальных усилителях этого не происходит. Всегда есть отличия, которые и составляют искажения, создаваемые усилителем. Искажения бывают двух видов: линейные и нелинейные.

Линейные искажения не нарушают амплитудных соотношений в усиливаемом сигнале. При наличии в усилителе линейных искажений сигнала, амплитудная характеристика не претерпевает никаких искажений. Тем не менее, линейные искажения, разумеется, искажают усиливаемый сигнал. Эти искажения связаны с неравномерностью амплитудно-частотной характеристики усилителя и нелинейности его фазочастотной характеристики. В связи с этим, линейные искажения часто называют частотными. Главным признаком линейных искажений является то, что они не вызывают появления в спектре выходного сигнала новых составляющих. В результате влияния линейных искажений, могут лишь изменяться уровни его отдельных спектральных (частотных) составляющих.

В отличие от линейных, **нелинейные** искажения вызывают нарушение линейности амплитудной характеристики усилителя. Искажения амплитудной характеристики усилителя приводят к существенным искажениям амплитудных соотношений в усиливаемом сигнале и могут вызывать значительные изменения его формы. В отличие от линейных искажений, нелинейные искажения всегда приводят к появлению в выходном сигнале дополнительных спектральных (частотных) составляющих, отсутствующих во входном сигнале. Если линейные искажения изменяют основную окраску звука, то проявление нелинейных искажений еще более пагубно, поскольку они приводят к существенным изменениям усиливаемого сигнала.

Анализ и расчет параметров усилительного каскада в режиме усиления малых сигналов целесообразно проводить, представив его эквивалентной схемой (рис.1.3) по переменному току, в которой транзистор изображается схемой замещения в системе h -параметров: h_{11} , $1/h_{22}$ - входное и выходное сопротивление транзистора, $h_{21}I_6$ - коэффициент передачи тока базы. Эквивалентная схема получается из принципиальной, если считать, что по переменному сигналу внутреннее сопротивление источника питания E_K и сопротивление эмиттерной цепи равны нулю ($X_{C\Phi}=1/\omega C_\Phi = 0$, $X_{C\varepsilon}=1/\omega C_\varepsilon = 0$), что всегда выполняется при правильном выборе C_ε и C_Φ в рабочем диапазоне частот.

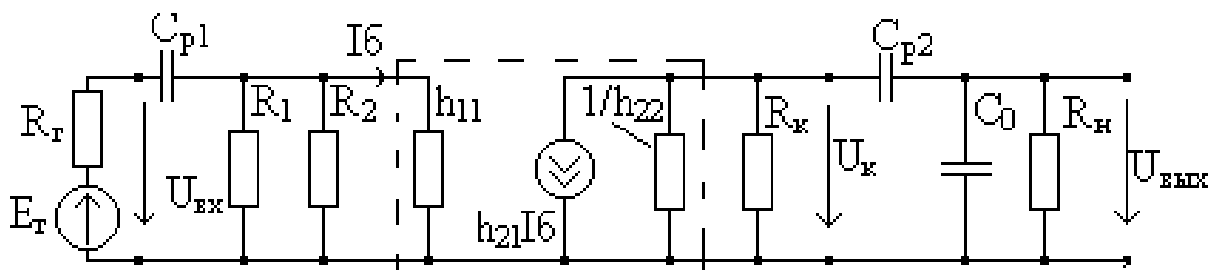


Рис.1.3. Эквивалентная схема усилителя для малых сигналов

При усилении непрерывных сигналов характеристики усилителя

рассматривают в предположении, что входной сигнал - гармонический. Одной из основных характеристик усилителя, определяющей его способность усиливать различные гармонические составляющие является комплексный коэффициент усиления $K(j\omega)$. Он представляет собой зависимость от частоты отношения комплексных амплитуд выходного и входного напряжений. Модуль комплексной функции $K(\omega)$ или амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) коэффициента усиления - зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов ($U_{m.вых}/U_{m.вх}$) от частоты. Фазочастотная характеристика (ФЧХ) – зависимость фазового сдвига между выходным и входным сигналами от частоты ($\varphi(\omega) = \varphi_{вых} - \varphi_{вх}$).

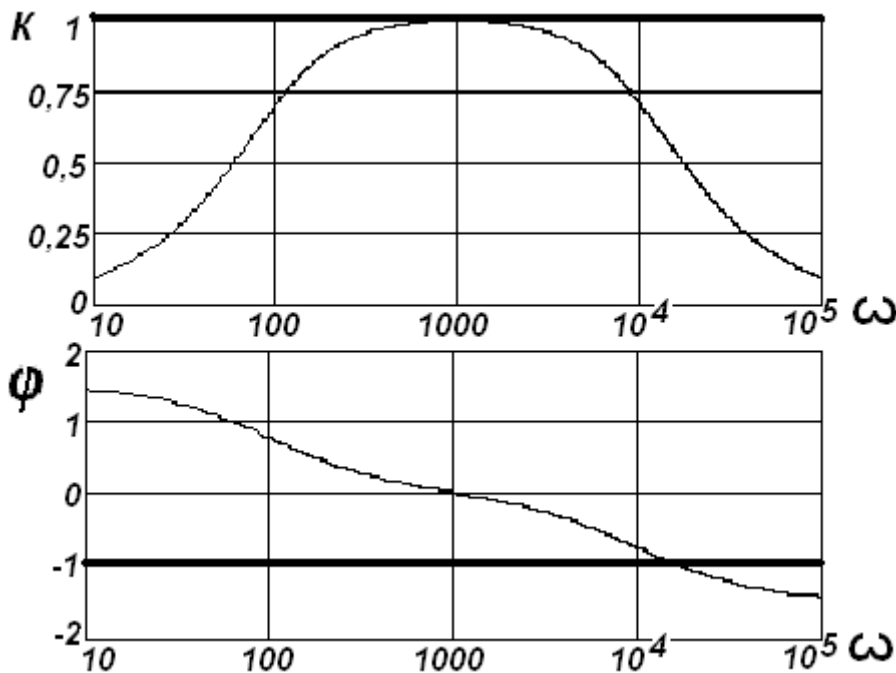


Рис.1.4. АЧХ и ФЧХ идеального и реального усилителей

На рис.1.4 приведены АЧХ и ФЧХ для идеального и реального усилителей. Для идеального усилителя АЧХ не зависит от частоты. Для реального усилителя АЧХ непостоянна, т.е., зависит от частоты. Уменьшение коэффициента усиления в области НЧ и ВЧ представляют собой линейные частотные искажения, создаваемые усилителем.

Весь диапазон частот разбивают на 3 участка: **область средних частот**, где коэффициент усиления практически не зависит от частоты (это область рабочих частот), **область низких частот** и **область высоких частот**. Частоты, на которых $K(\omega) = K_U/\sqrt{2} \approx 0,707K_U$, являющиеся границами рабочего диапазона, называют граничными частотами в области нижних ($f_{Н.гр}$) и области верхних ($f_{В.гр}$) частот.

Особенности в области средних частот

Здесь влиянием C_{p1} , C_{p2} и C_0 можно пренебречь т.к. $X_{C0} \gg R_H$, а $X_{CP1} \ll h_{11}$ и $X_{CP2} \ll R_H$, а потому эквивалентная схема (рис.1.3) для области средних частот упрощается (рис.1.5). Коэффициент усиления по напряжению определяется выражением:

$$K_U^0 = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = -h_{21} \cdot R_{\text{Н.ЭКВ}} / (R_r + R_{\text{ВХ}}),$$

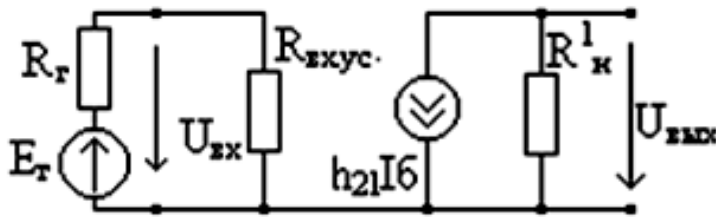


Рис.1.5. Эквивалентная схема усилителя на средних частотах

где h_{21} - коэффициент усиления тока базы для транзистора, включенного по схеме с ОЭ;

$R_{\text{ВХ}} = h_{11}$ - входное сопротивление усилителя (т.к. обычно R_1 и $R_2 > h_{11}$);

$R_{\text{Н.ЭКВ}} = (1/h_{22})$ - эквивалентное сопротивление нагрузке

транзисторного каскада;

R_r - внутреннее сопротивление источника сигнала.

Коэффициент усиления действительное число. Величина его зависит от выбора транзистора (h_{11}, h_{21}) и резисторов $R_{\text{Н.ЭКВ}}$, $R_{\text{ВХ}}$, R_r . Знак (-) говорит о том, что происходит инвертирование выходного сигнала (сдвиг по фазе на 180°) относительно сигнала на входе.

Особенности в области низких частот

Здесь необходимо учитывать разделительные конденсаторы C_{P1} и C_{P2} т.к. на низких частотах их сопротивления становятся соизмеримыми с $R_{\text{ВХ}}$ и $R_{\text{Н.ЭКВ}}$. Паразитной емкостью C_0 можно пренебречь, т.к. $X_{C0} \gg R_{\text{Н}}$ (рис.1.6). На низких частотах часть усиленного входного сигнала $U_{\text{ВХ}}$ падает на

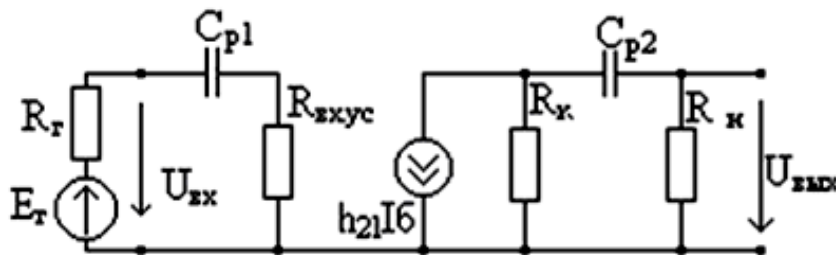


Рис.1.6. Эквивалентная схема усилителя на низких частотах

разделительных конденсаторах (C_{P1} и C_{P2}), причем с уменьшением частоты их сопротивление возрастает. Выходное напряжение уменьшается а, следовательно, это приводит к уменьшению

коэффициента усиления по сравнению с его значением K_U^0 в диапазоне средних частот.

Коэффициент усиления в области низких частот имеет вид

$$K_U^H(j\omega) = \frac{K_U^0}{\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau_{H1}}\right) \cdot \left(1 + \frac{1}{j\omega\tau_{H2}}\right)} \approx \frac{K_U^0}{\left(1 + \frac{1}{j\omega\tau_H}\right)},$$

где $\tau_{H1} = C_{P1} R_{BX}$ - постоянная времени в области НЧ, определяемая C_{P1} ;

$\tau_{H2} = C_{P2} R_{BX}$ - постоянная времени в области НЧ, определяемая C_{P2} ;

$\tau_H = \tau_{H1} \tau_{H2} / (\tau_{H1} + \tau_{H2})$ - эквивалентная постоянная времени каскада в области НЧ, определяемая разделительными конденсаторами C_{P1} и C_{P2} .

Таким образом, для уменьшения неравномерности АЧХ в области НЧ (расширения полоса пропускания), необходимо увеличивать τ_H . Это достигается путем увеличения значений C_{P1} и C_{P2} , а также увеличением значений R_{BX} и $R_{H.ЭКВ}$.

Особенности в области верхних частот

Эквивалентная схема для области верхних частот приведена на рис.1.7. Здесь из общей схемы исключены C_{P1} и C_{P2} , т.к. $X_{CP1} \ll R_{BX}$, $X_{CP2} \ll R_H$. В этом диапазоне частот необходимо учитывать:

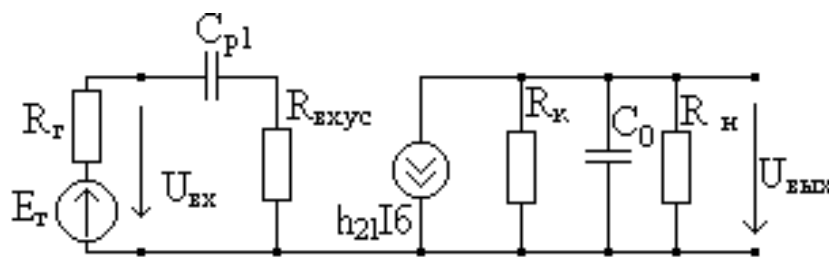


Рис.1.7. Эквивалентная схема усилителя на высоких частотах

1) инерционные свойства транзистора, т.е. уменьшение коэффициента передачи тока базы транзистора от частоты;

2) паразитную емкость C_0 , которая шунтирует эквивалентное

сопротивление нагрузки $R_{H.ЭКВ}$, а следовательно уменьшает коэффициент усиления транзисторного каскада. В результате с увеличением частоты амплитуда выходного напряжения и, следовательно, коэффициент усиления уменьшаются. Комплексный коэффициент передачи каскада в области высоких частот (ВЧ) с учетом обоих факторов имеет вид:

$$K_U^B(j\omega) = \frac{K_U^0}{(1 + j\omega\tau_B)},$$

где $\tau_B = \tau_\beta + \tau_0$;

$\tau_\beta = \beta_0 / (2\pi f_\alpha)$ - постоянная времени транзистора по схеме с ОЭ;

f_α - верхняя граничная частота транзистора по схеме с ОБ;

$\tau_0 = C_0 R_{H.ЭКВ}$ - постоянная времени в области высоких частот, определяемая C_0 .

Для уменьшения неравномерности АЧХ в области ВЧ (расширения полоса пропускания) необходимо уменьшить τ_B . Однако, значительно уменьшить τ_B рациональным выбором элементов схемы невозможно т.к. τ_B определяется кроме элементов и параметрами транзистора. Поэтому для расширения диапазона усиливаемых частот в области ВЧ необходимо выбирать транзистор с малой τ_B .

Особенности работы усилителя в импульсном режиме

При усилении импульсных сигналов искажения создаваемые усилителем оцениваются по параметрам ее переходной характеристики (ПХ). Под переходной характеристикой $h(t)$ понимают отклик (выходной сигнал) при подаче на вход скачка (перепада) напряжения

$$U_1(t) = E_0 \cdot l(t)$$

где E_0 - амплитуда перепада;
 $l(t)$ - единичная функция.

На рис.1.8 приведены переходные характеристики идеального усилителя $h(t) = K_u^0 l(t)$ и реального

$$h(t) = K_U^0 (e^{-t/\tau_H} - e^{-t/\tau_B})$$

где τ_H и τ_B - постоянные времени транзисторного каскада в области низких и верхних частот, причем $\tau_H \gg \tau_B$.

Отличие между идеальной и реальной ПХ наблюдаются в области малых времен, когда $t < \tau_B$, т.е. $t \rightarrow 0$ и в области больших времен, когда $t \geq \tau_H$ т.е. $t \rightarrow \infty$.

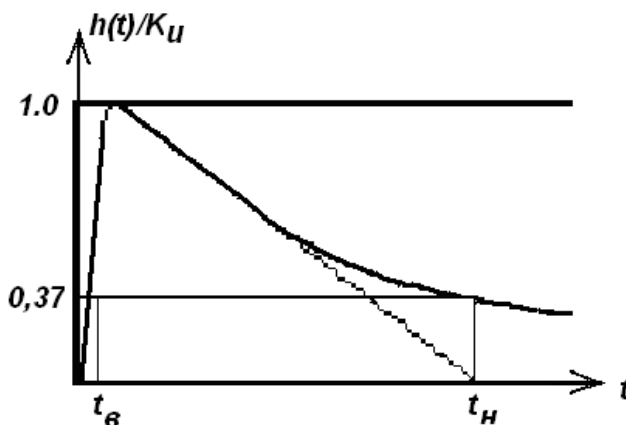


Рис.1.8. Идеальная и реальная переходные характеристики

Для области малых времен ($t \ll \tau_H$) выражение для $h(t)$ можно упростить:

$$h(t) = 1 - e^{-t/\tau_B}$$

Этому выражению соответствует эквивалентная схема на рис.1.7. Искажения состоят в затягивании фронта перепада напряжения и

объясняются конечным значением τ_B . Они связаны с тем, что напряжение на емкости C_0 мгновенно измениться не может. Чем меньше τ_B , тем лучше воспроизводится фронт перепада напряжения. Искажения в области малых времен оценивают длительностью переднего фронта t_ϕ – временем, в течение которого выходное напряжение изменяется от $0.1U_0$ до $0.9U_0$. Это время связано с τ_B а, следовательно, с верхней граничной частотой f_B АЧХ, соотношением $t_\phi = 2,2 \tau_B = 0,35/f_B$. Таким образом, чем меньше τ_B , тем шире полоса пропускания усилителя и тем меньше искажение фронта импульса.

Для больших времен ($t \gg \tau_B$) и ПХ можно записать:

$$h(t) = e^{-t/\tau_B} \approx 1 - t/\tau_B.$$

Этому выражению соответствует эквивалентная схема для области низких частот (см. рис.1.6). Искажения входного сигнала связаны с невозможностью передачи через разделительные конденсаторы C_{P1} и C_{P2} постоянной составляющей входного сигнала и состоят в спаде плоской части перепада напряжения. Чем больше τ_H , тем меньше нижняя граничная частота, тем меньше скорость спада, т.е. искажения.

Работа усилительного каскада в режиме большого сигнала

Режим работы усилительного каскада при малом входном сигнале, когда ($U_{m.вых} \ll E_K/2$), где $U_{m.вых}$ – амплитуда выходного сигнала, E_K – напряжение коллекторного питания, можно считать линейным. При этом форма выходного сигнала соответствует форме входного сигнала.

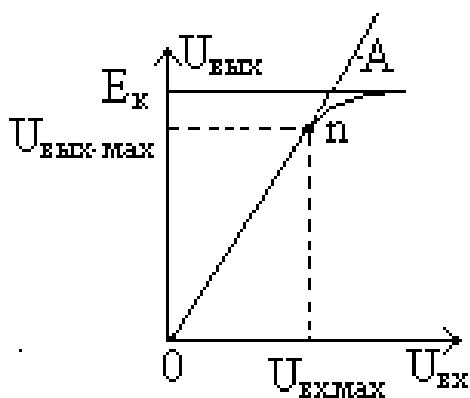


Рис.1.9. Амплитудная характеристика усилителя

При большом входе сигнала, когда ($U_{m.вых} \approx E_K/2$) т.е. когда эти величины соизмеримы, форма выходного сигнала отличается от входного. Эти отличия обусловлены нелинейностью ВАХ транзистора и называются нелинейными искажениями усилителя.

Диапазон изменения выходного сигнала, усиливаемого без искажений можно оценить по амплитудной характеристике (АХ). АХ представляет собой зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного ($U_{m.вых} = f(U_{m.вх})$) (рис.1.9).

Для идеального усилителя A_X – это прямая (прямая А на рис.1.9). Для реального усилителя она нелинейна. Линейный участок A_X (0-n) позволяет определить входной максимальный сигнал $U_{ВХ.МАХ}$, а также и выходной максимальный сигнал $U_{ВЫХ.МАХ}$, при котором нелинейные искажения незначительны. По A_X , в линейной ее части, можно определить коэффициент усиления усилителя $K_U = \Delta U_{m.ВЫХ} / \Delta U_{m.ВХ}$.

Задание 1.1. Исследование влияния элементов схемы на амплитудную характеристику усилителя

Порядок исследования:

1. Набрать схему предварительного усилительного каскада, рассчитанную по индивидуальному варианту в разделе 1, на рабочем поле моделирующей программы Electronics Workbench. В случае отсутствия расчетов по указанию преподавателя параметры элементов должны быть:

$R1=39\text{к}$, $R2=10\text{к}$, $R_k=2\text{к}$, $R_э=1\text{к}$, $R_{H1}=2\text{к}$, $R_{H2}=1\text{к}$, $C_{P1}=10\text{мкФ}$, $C_{P2}^1=1\text{мкФ}$, $C_{P2}^{11}=2\text{мкФ}$; $C_э=10\text{мкФ}$, $C_0=22\text{нФ}$, $h_{11}=1\text{к}$, $h_{21}=40$, $h_{22}=1,5 \cdot 10^{-4}\text{См}$, $C_f=20\text{мкФ}$ (рис.1.10);

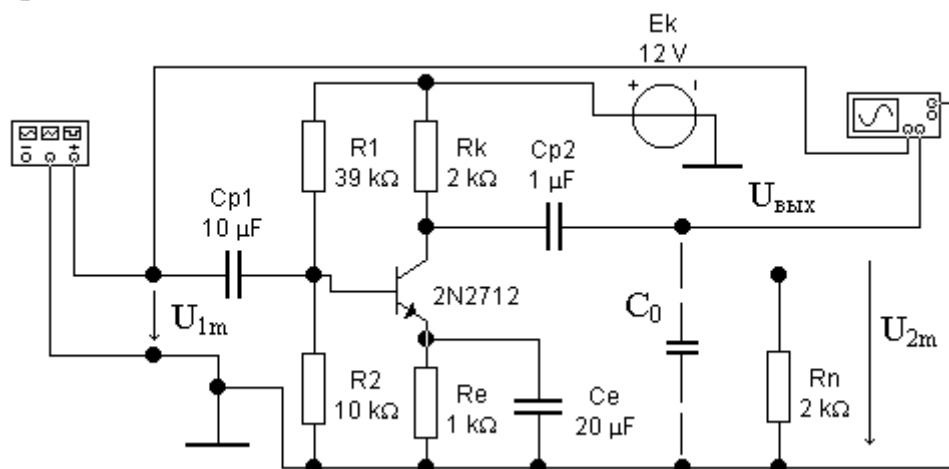


Рис. 1.10. Схема усилительного каскада

2. Подать на вход усилителя последовательно $U_{ВХ}=10\text{мВ}$ и 120мВ при частоте 1000 Гц . Вход осциллографа подключить к выходу усилителя и добиться на экране осциллографа устойчивого изображения сигнала с помощью синхронизации. Снять осциллограммы выходного сигнала усилителя. Величину сигнала контролировать вольтметром или осциллографом.

Зарисовать в отчет выходные сигналы и рассчитать коэффициент усиления ($K_0 = U_{m.ВЫХ} / U_{m.ВХ}$) для обоих случаев. Обратить внимание на искажения при большом входном сигнале. За амплитуду принимать

половину размаха сигнала. Сделать вывод о причине искажения сигнала при больших амплитудах входного сигнала;

3. Снять амплитудную характеристику усилителя при $R_H = \infty$. Измерения проводить в диапазоне изменения входного сигнала 0-120мВ с шагом 20мВ на частоте 1000Гц. Величину входного и выходного напряжений измерять вольтметром или осциллографом. Результаты измерений занести в табл.1 в строку $U_{m.ВЫХ} |_{R_H = \infty}$;

4. Повторить задание по п.3 при R_H равном расчетному (при работе с рабочим вариантом схемы $R_H = R_{H1} = 2\text{кОм}$). Результаты занести в табл.1 строка $U_{m.ВЫХ} |_{R_H = 2\text{кОм}}$;

Таблица 1

Данные для построения амплитудной характеристики

$U_{m.ВХ}$ (мВ)	0	20	40	60	80	100	120
$U_{m.ВЫХ} _{R_H = \infty}$							
$U_{m.ВЫХ} _{R_H = 2\text{кОм}}$							

5. По результатам измерений построить обе амплитудные характеристики на одном графике. Указать линейные участки АХ. Рассчитать коэффициенты усиления K_u^0 и сравнить с рассчитанным в разделе 1;

6. Сделать вывод о причине различий двух кривых АХ;

7. Для параметров схемы задания по п.4 изменить величину R_E и снять показания для построения АХ. Показать, что эмиттерное сопротивление R_E , создающее отрицательную обратную связь, практически не влияет на коэффициент усиления в рабочем диапазоне частот до $f_{н.гр} = 100$ Гц. Сделать вывод о причине отсутствия такого влияния.

В отчете представить:

- схему усилителя, если ее не было в предыдущих отчетах;
- осциллограммы по п.2 задания;
- расчеты и значение коэффициента усиления усилителя, вывод о его совпадении с расчетным;
- вывод о причинах искажения выходного сигнала при больших амплитудах входного сигнала;
- таблицу для построения амплитудной характеристики;
- график амплитудной характеристики при различных сопротивлениях нагрузки;
- вывод о причинах несовпадения амплитудных характеристик при различных сопротивлениях нагрузки;
- вывод о влиянии сопротивления эмиттера на амплитудную характеристику в рабочем диапазоне частот.

Задание 1.2. Анализ влияния элементов схемы на амплитудно-частотную (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристику

Порядок исследования:

1. Схема измерений АЧХ аналогична схеме измерений АХ. Снять АЧХ усилительного каскада при расчетных R_H и C_{P2} (для рабочего варианта $R_H = R_{H1}$; $C_{P2} = C_{P2}^1$). Для этого, изменяя частоту гармонического сигнала на входе усилителя в диапазоне 10Гц - 100кГц и поддерживая его амплитуду 10мВ, измерять амплитуду выходного напряжения. Результаты измерений заносить в табл.2;

Таблица 2

Данные для построения частотных характеристик

Пункт задания	F(Гц)	10	20	50	100	200	500	10^3	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3$	10^4	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	10^5
	Lg(f)	1	1.3	1.7	2	2.3	2.7	3	3.3	3.7	4	4.3	4.7	5
1	U_{2m}													
	K_U													
2	U_{2m}													
	K_U													
1	φ_K													
2	φ_K													

2. Рассчитать коэффициент усиления $K_u = U_{m.вых}/U_{m.вх}$, при $U_{m.вх} = 10\text{мВ}$;

3. Повторить задание по пп.1 и2, уменьшив вдвое расчетное R_H и увеличив вдвое C_{P2} (для рабочего варианта $R_H = R_{H2}$; $C_{P2} = C_{P2}^{11}$).

4. Построить амплитудно-частотные характеристики $K(f)$ для двух случаев на одном графике;

5. Определить графически граничные частоты (f_H , f_B) и сравнить их с расчетными;

6. Сделать вывод о влиянии сопротивления нагрузки и разделительной емкости на АЧХ усилителя. Объяснить причины такого влияния.

В отчете представить:

- таблицу с данными для построения АЧХ;
- графики АЧХ для двух вариантов параметров схемы;
- значения граничных частот и вывод о совпадении с расчетными;
- вывод о влиянии сопротивления нагрузки и разделительной емкости на АЧХ усилителя с объяснением причин такого влияния.

Задание 1.3. Анализ влияние элементов схемы усилителя на АЧХ и ФЧХ усиления с помощью измерителя диаграмм Боде

Порядок исследования:

1. Собрать схему (рис.1.11) с номиналами расчетных элементов (для рабочего варианта схемы $R_H = R_{H1}$; $C_{P2} = C_{P2}^1$);

2. Установить измеритель диаграмм Боде в режим измерения АЧХ (Magnitude), масштаб по оси Y (Vertical – параметры вертикальной оси) – линейный (Lin), а по оси X (Horizontal – параметры горизонтальной оси) – логарифмический (Log), диапазон частотного анализа от 10Гц (I – Initial – начальное значение) до 100кГц (F – Final – конечное значение);

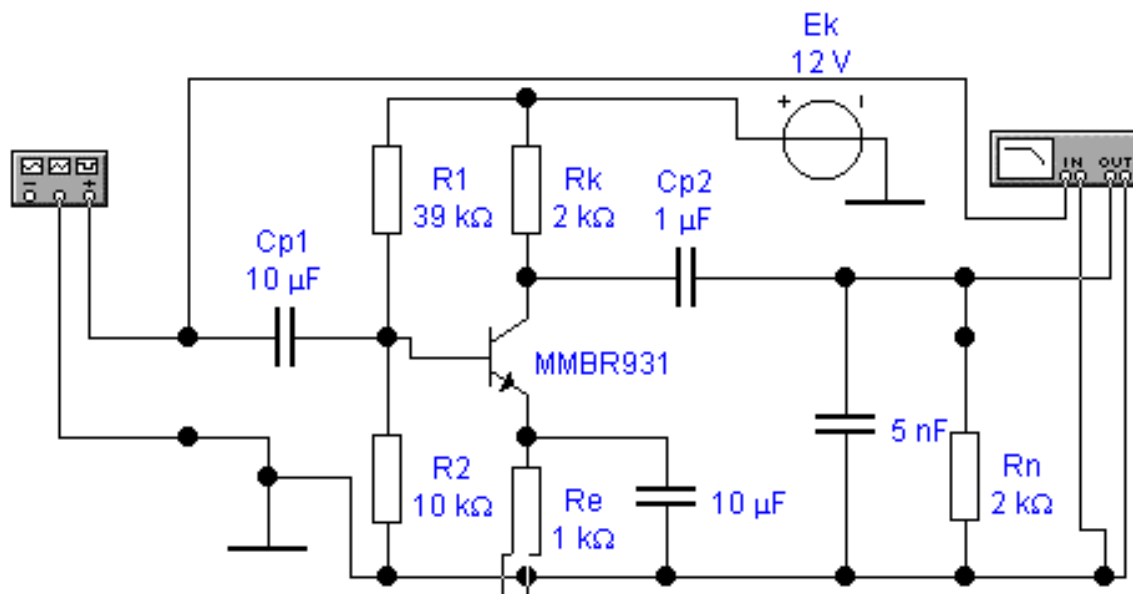


Рис.1.11. Схема измерения АЧХ и ФЧХ с помощью измерителя Боде

3. С помощью визирной линии произвести измерения коэффициентов передачи на частотах указанных в таблице 2. Проверить данные таблицы, в случае несоответствия данных, уточнить частоты и провести новые измерения;

4. Повторить задание по п.3, уменьшив вдвое расчетное R_H и увеличив вдвое C_{P2} (для рабочего варианта схемы $R_H = R_{H2}$; $C_{P2} = C_{P2}^{11}$);

5. Вычертить в отчете обе кривые АЧХ на одном графике.

6. Сделать вывод о влиянии сопротивления нагрузки и разделительной емкости на АЧХ усилителя с объяснением причин такого влияния;

7. Установить измеритель диаграмм Боде в режим измерения ФЧХ (кнопка Phase), масштабы и диапазон анализа оставить прежние;

8. С помощью визирной линии произвести измерения фазовых сдвигов на частотах указанных в таблице 2. Результаты измерений занести в таблицу 2 в строку 2-го пункта задания;

9. Изменить параметры цепей на расчетные (для рабочего варианта схемы $R_H = R_{H1}$; $C_{P2} = C_{P2}^1$). С помощью визирной линии произвести измерения фазовых сдвигов на частотах указанных в таблице 2. Результаты измерений занести в таблицу 2 в строку 1-го пункта задания;

10. По результатам измерения построить ФЧХ $\varphi_k(f)$ для двух вариантов цепей на одном графике. Сделать вывод о влиянии сопротивления нагрузки и разделительной емкости на ФЧХ усилителя с объяснением причин такого влияния.

В отчете представить:

- схему измерения с помощью измерителя диаграмм Боде;
- таблицу с данными для построения АЧХ;
- графики АЧХ для двух вариантов параметров схемы;
- вывод о влиянии сопротивления нагрузки и разделительной емкости на АЧХ усилителя с объяснением причин такого влияния;
- таблицу с данными для построения ФЧХ;
- графики ФЧХ для двух вариантов параметров схемы;
- вывод о влиянии сопротивления нагрузки и разделительной емкости на ФЧХ усилителя с объяснением причин такого влияния.

Задание 1.4. Анализ влияния элементов схемы на переходную характеристику (ПХ) усилительного каскада

Порядок исследования:

1. Подключить осциллограф к схеме усилителя (см. рис.1.10) с расчетными параметрами (для рабочего варианта схемы $R_H = R_{H1}$; $C_{P2} = C^{1}_{P2}$);

2. Настроить осциллограф на работу с внешней синхронизацией для получения устойчивого изображения ПХ. Для этого в группе элементов управления для ждущего режима (Trigger) осциллограф перевести в режим синхронизации, по каналу А, подобрав впоследствии фронт запуска развертки (Edge);

3. Настроить входной генератор прямоугольных импульсов на выдачу однополярных прямоугольных импульсов амплитудой 10мВ. Частоту следования импульсов подобрать так, чтобы ПХ имела необходимый вид;

4. Добиться на экране устойчивое изображение ПХ (аналогичный рис.1.8) и зарисовать ее в отчет, указав по осям ПХ их масштаб. Показать и измерить по графику τ_H и τ_B ;

5. Уменьшить скорость развертки луча осциллографа и добиться подробного изображения ПХ на экране в области больших времен. Зарисовать в отчет вид ПХ в области больших времен. Показать на графике ПХ - τ_H ;

6. Измерить τ_H при:

а) расчетных параметрах R_H и C_{P2} (рабочий вариант $R_H = R_{H1}$; $C_{P2} = C^{1}_{P2}$);

б) расчетных параметрах R_H и $2C_{P2}$ (рабочий вариант $R_H = R_{H1}$; $C_{P2} = C^{11}_{P2}$);

в) расчетных параметрах $R_H/2$ и C_{P2} (рабочий вариант $R_H = R_{H2}$; $C_{P2} = C_{P2}^1$);

7. Сделать вывод о влиянии R_H и C_{P2} на τ_H (в области больших времен);

8. Увеличить скорость развертки луча осциллографа и добиться подробного изображения ПХ на экране в области малых времен. Зарисовать в отчет вид ПХ в области малых времен. Показать на графике ПХ - τ_B .

Измерить τ_B при:

а) расчетных параметрах $R_H = \infty$ и C_{P2} (рабочий вариант $R_H = \infty$; $C_{P2} = C_{P2}^1$);

б) расчетных параметрах R_H и C_{P2} (рабочий вариант $R_H = R_{H1}$; $C_{P2} = C_{P2}^1$);

в) расчетных параметрах R_H и $2C_{P2}$ (рабочий вариант $R_H = R_{H1}$; $C_{P2} = C_{P2}^{11}$);

9. Сделать вывод о влиянии R_H и C_{P2} на τ_B (в области малых времен).

В отчете представить:

- изображение ПХ, величины измеренных по графику τ_H и τ_B ;

- изображение ПХ в области больших времен, значения измеренных τ_H для различных значений R_H и C_{P2} ;

- вывод о влиянии сопротивления нагрузки и разделительной емкости на ПХ усилителя в области больших времен с объяснением причин такого влияния;

- изображение ПХ в области малых времен, значения измеренных τ_H для различных значений R_H и C_{P2} ;

- вывод о влиянии сопротивления нагрузки и разделительной емкости на ПХ усилителя в области малых времен с объяснением причин такого влияния.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое усилитель. Какова его структурная схема.
2. Нарисовать принципиальную схему усилителя и объяснить назначение элементов.
3. Какие показатели характеризуют работу усилителя.
4. Нарисовать эквивалентную схему и объяснить, как она составлена.
5. Какие элементы схемы влияют на коэффициент передачи в области средних частот.
6. Как элементы создают искажения в области низких частот. Как их уменьшить.
7. Какие элементы создают искажения в области высоких частот. Как их уменьшить.

8. Какие элементы создают искажения в области малых времен переходной характеристики. В чем они состоят и чем оцениваются.
9. Какие элементы создают искажения в области больших времен переходной характеристики. В чем они состоят и чем оцениваются.
10. Как влияют цепь $R C$ на АЧХ усилителя.
11. Как влияет схема включения транзистора на показатели усилителя.
12. Как зависят усиление и искажения от числа каскадов в многокаскадном усилителе.
13. Какие искажения наблюдаются при усилении прямоугольного импульса.
14. Амплитудная характеристика. Ее параметры. Нелинейные искажения.
15. Объяснить методику измерения АЧХ с помощью осциллографа (вольтметра).
16. Объяснить методику измерения АЧХ с помощью измерителя диаграмм Бодэ.
17. Объяснить методику измерения АХ.
18. Чем отличаются входы осциллографа АС и DC?
19. При частоте входного сигнала 100 Гц какова должна быть развертка осциллографа, чтобы на экране наблюдать два полных периода колебаний?

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОММУТАТОРОВ

Цель

1. Ознакомиться с принципом работы коммутаторов аналоговых сигналов;
2. Получить практические навыки измерения частотной характеристики коммутатора, сопротивления канала и времени задержки сигнала;
3. Усвоить методы компьютерного моделирования работы интегрального коммутатора и измерения его основных характеристик.

Учебные вопросы

- 2.1. Исследование интегрального коммутатора на лабораторном стенде;
- 2.2. Исследование интегрального коммутатора с помощью компьютерного моделирования.

Литература для подготовки к занятию

1. Соколов С.В., Титов Е.В. Основы схемотехники. Ростов н/Д.: СКФ МТУСИ, 2010. – 210с.
2. Павлов В. Н, Ногин В. Н., Схемотехника аналоговых электронных устройств. Для высших учебных заведений. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 320с.
3. Петин Г.П., Аналоговая схемотехника. - Ростов-на/Д.: ЮФУ , 2010. - 314с.
4. Алиев И. И., Виртуальная электротехника. Компьютерные технологии в электротехнике и электронике. М.: РадиоСофт, 2003. – 240с.
5. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench / Под ред. Д.И.Панфилова. - М.: Додэка, 1999.
6. Кардашев Г.А. Цифровая электроника на персональном компьютере / Г.А.Кардашев. М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 311 с. : ил. (Массовая радиобиблиотека; 1263)

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. По каждому из заданий должны быть представлены название задания и те конкретные данные, которые указаны в задании.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Назначение и область применения коммутатора.
2. Какие бывают виды коммутаторов?
4. Какие основные характеристики имеет коммутатор?
5. На какой вывод полевого транзистора в коммутаторе подается управляющее напряжение?

Краткие сведения из теории

Коммутаторы на полевых транзисторах с управляющими p - n переходами и с изолированным затвором в настоящее время получили преимущественное распространение в интегральных микросхемах. Прежде всего, это связано с их следующими преимуществами: малые токи утечки, низкое потребление по цепи управления, отсутствие напряжения смещения, технологичность производства.

Как известно, полевой транзистор в области малых напряжений сток-исток ведет себя как резистор, сопротивление которого может изменяться во много раз при изменении управляющего напряжения затвор-исток $U_{зи}$. На рис.2.1 изображена упрощенная схема последовательного коммутатора на полевом транзисторе с управляющим p - n -переходом.

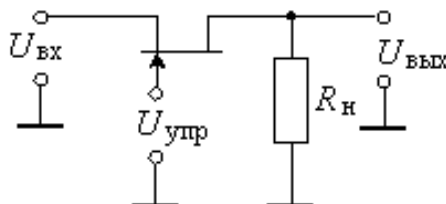


Рис.2.1. Последовательный коммутатор на полевом транзисторе с управляющим p - n -переходом

Если в этой схеме управляющее напряжение $U_{упр}$ установить больше 0, то транзистор закроется, вход и выход коммутатора будут разделены большим сопротивлением (десятки МОм), сигнал с входа коммутатора на его выход не проходит. Если же управляющее напряжение $U_{упр}$ установить равным 0, то транзистор откроется, и выход коммутатора окажется соединенным со входом. Особенностью коммутаторов на полевых транзисторах с изолированным затвором является сильная зависимость сопротивления открытого канала от коммутируемого сигнала, что приводит к модуляции проводимости канала входным сигналом и возникновению дополнительных нелинейных искажений. Для снижения таких искажений в коммутаторах ограничивают уровень входных сигналов и используют сравнительно большое сопротивление нагрузки ключа.

Проблемы подобного рода не возникают, если в качестве коммутатора использовать полевой транзистор с изолированным затвором (МОП-транзистор). Его можно переводить в открытое состояние, подавая управляющее напряжение большее, чем максимальное входное положительное напряжение, причем и в таком режиме работы ток затвора будет равен нулю. Схема коммутатора на МОП-транзисторе приведена на рис.2.2,а. Здесь коммутатором является n -канальный МОП-транзистор обогащенного типа, не проводящий ток при $U_{упр} \leq 0$.

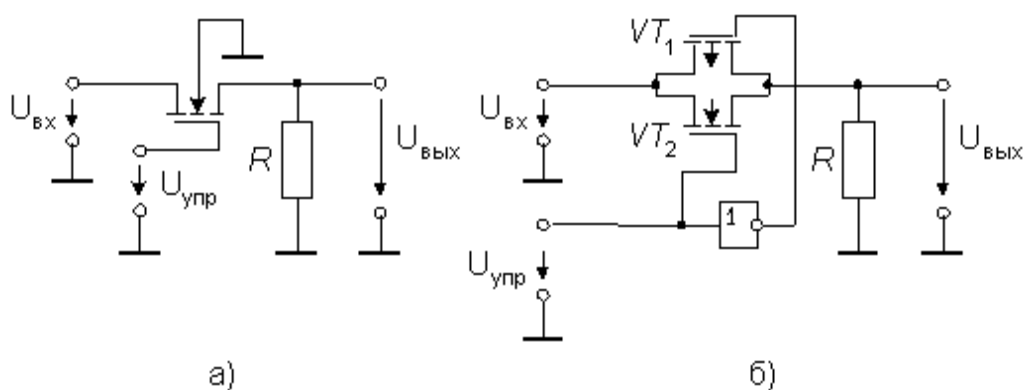


Рис.2.2 - Последовательные коммутаторы на МОП-транзисторах

В этом состоянии (при $U_{\text{упр}} \leq 0$) сопротивление канала, как правило, достигает единиц или даже десятков ГОм, и сигнал не проходит через коммутатор. Подача на затвор относительно истока значительного положительного напряжения приводит канал в проводящее состояние с типичным сопротивлением от 20 до 200 Ом для транзисторов, используемых в качестве аналоговых коммутаторов.

Приведенная на рис.2.2,а схема будет работать при положительных входных сигналах, которые по крайней мере на 5 В меньше, чем $U_{\text{упр}}$; при более высоком уровне сигнала напряжение затвор-исток будет недостаточно, чтобы удержать транзистор в открытом состоянии.

Кроме отдельных транзисторов в качестве коммутаторов широкое распространение получили схемы, содержащие параллельное соединение двух МОП-транзисторов с разным типом проводимости канала (комплементарные транзисторы). Это позволило избавиться от многих недостатков коммутаторов на одиночных транзисторах: устранена модуляция сопротивления канала входным сигналом, снижены помехи из цепи управления, снижено сопротивление коммутатора в открытом состоянии и уменьшен ток утечки. Схема коммутатора на комплементарных транзисторах показана на рис.2.2,б. Для одновременного переключения транзисторов из включенного состояния в выключенное сигнал управления подается на затвор одного транзистора непосредственно, а на затвор другого – через инвертор.

При увеличении входного напряжения сопротивление р-канального транзистора увеличивается, а n-канального уменьшается. В результате параллельное соединение этих транзисторов имеет почти неизменное сопротивление в открытом состоянии, как показано на рис.2.3. Поскольку транзисторы ключа управляются сигналами противоположной полярности, то импульсы помех взаимно компенсируются, что позволяет снизить уровень входных сигналов.

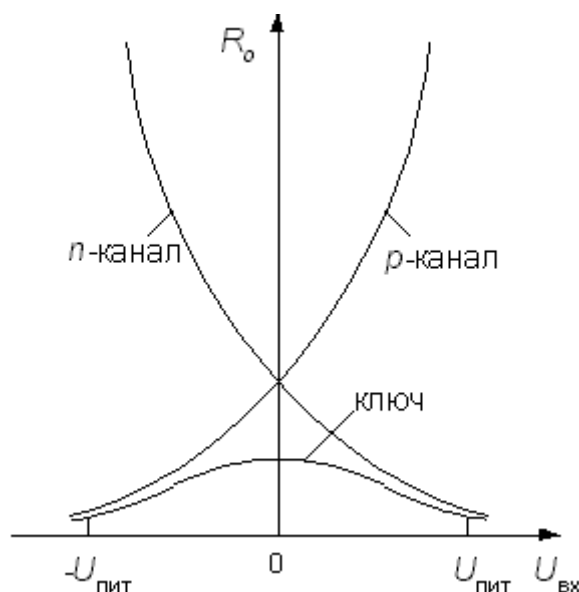


Рис.2.3. Зависимость сопротивлений каналов транзисторов КМОП-ключа от $U_{ВХ}$

В лабораторной работе исследуется принцип работы аналоговых коммутаторов на основе МОП-структур. В этих коммутаторах источник аналогового сигнала подключается к нагрузке через канал МОП-транзистора (рис.2.4).

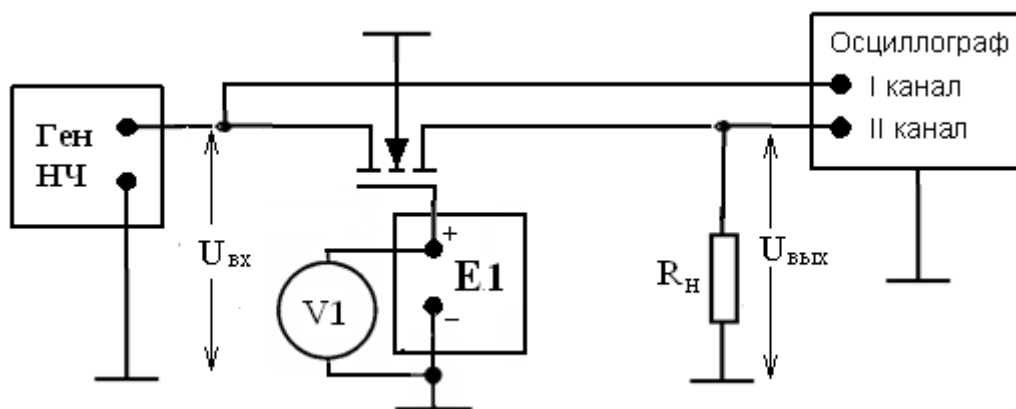


Рис.2.4. Схема исследования коммутатора на МОП-транзисторе

При подаче на затвор положительного напряжения индуцируется канал, через который нагрузка подключается к генератору.

В работе используются один из транзисторов микросхемы К176ЛП1, схема которой приведена на рис.2.5. Такой же принцип лежит в основе интегральных коммутаторов аналоговых сигналов, например, К176КТ1.

Основные электрические параметры ИМС: напряжение питания $U_{П}=9В+5\%$, уровни логических сигналов $U_{ВЫХ}^0 \leq 0,3В$; $U_{ВЫХ}^1 \geq 8,2В$;

потребляемый ток, мА, не более 0,3; среднее время задержки распространения ≤ 200 мс.

Работоспособность сохраняется при уменьшении напряжения питания до 5В. Допустимый диапазон входных сигналов (0 - $U_{п}$).

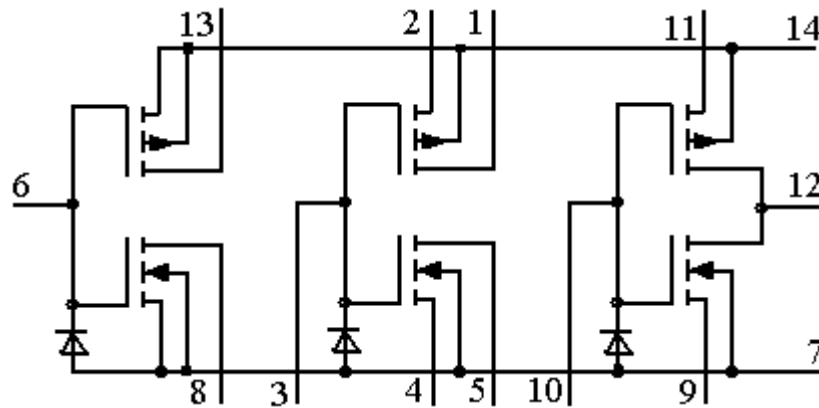


Рис.2.5. Структура ИМС К176ЛП1

Задание 2.1. Исследование интегрального коммутатора на лабораторном стенде

Порядок исследования:

1. Собрать аналоговый коммутатор на МДП-транзисторе на лабораторной установке "Электронные приборы" (рис.2.4), используя микросхему К176ЛП1. Подключить выход генератора НЧ и выход коммутатора к входам осциллографа. Сопротивление нагрузки $R_H = 1$ кОм. Схему электрическую принципиальную занести в отчет;

2. Установить напряжение источника E_1 $U_{упр} = 0$ В. Подать на вход схемы напряжение от генератора НЧ $U_{г} = 0,2 \dots 0,3$ В с частотой $f = 1000$ Гц и с помощью внешней синхронизации получить устойчивую осциллограмму входного напряжения. Измерение входного и выходного напряжений проводить с помощью осциллографа. Занести значение $U_{г}$ в отчет. В дальнейшем значение $U_{г}$ не менять;

3. Увеличивая напряжение $U_{упр}$, определить минимальный уровень управляющего сигнала, при котором открывается канал (появляется выходной сигнал на осциллографе), затем остановить такую величину $U_{упр}$, при котором будут отсутствовать нелинейные искажения выходного сигнала. Зарисовать осциллограммы входного сигнала и выходного сигнала $U_{н}$ при открытии канала и выходного неискаженного сигнала. Значения $U_{упр}$ при открытии канала и при неискаженном $U_{вых}$ занести в отчет;

4. Используя закон Ома, вычислить сопротивление открытого канала. Полученное значение занести в отчет;

5. Снять частотную характеристику $K_U(f) = \frac{U_{вых}(f)}{U_{г}}$ открытого ключа, для чего измерить $U_{вых}$ на частотах $f = 1$ кГц, 10 кГц, 100 кГц, 1 МГц и 10 МГц.

Значения f , $U_{\text{ВЫХ}}$ и K_U занести в таблицу. Определить граничную частоту $f_{\text{ГР}}$, на которой выходное напряжение составляет 0,707 от величины напряжения на частоте $\Gamma=1000$ Гц. Кривую частотной характеристики занести в отчет;

6. С помощью осциллографа измерить время задержки распространения сигнала в канале, подав на вход сигнал U_{Γ} с частотой 2,5 МГц, установив $U_{\text{УПР}} = 5 \dots 7$ В и скорость развертки равной 0,05 мкс/дел.

В отчете представить:

- схему принципиальную электрическую для исследования;
- осциллограммы сигналов на входе и выходе коммутатора по п.3;
- значения напряжения открытия и входного неискаженного сигнала;
- расчеты и значение сопротивления открытого канала;
- таблицу для построения и кривую частотной характеристики коммутатора;
- значение граничной частоты полосы пропускания;
- время задержки распространения сигнала

Задание 2.2. Исследование интегрального коммутатора с помощью компьютерного моделирования.

Порядок исследования:

1. Построить схему (рис.2.6) на экране монитора, используя программу Electronics Workbench. Использование другой среды моделирования не воспрещается. В качестве активного элемента использовать идеальный МДП-транзистор n-типа, нагрузочное сопротивление задается преподавателем в пределах 1 – 5 кОм;

2. Подать на вход схемы напряжение $U_{\Gamma} = 0,5$ В с частотой $f = 1000$ Гц, занести значение U_{Γ} в отчет. В дальнейшем значение U_{Γ} не менять;

3. Увеличивая напряжение $U_{\text{УПР}}$, определить минимальный уровень управляющего сигнала, при котором открывается канал, затем установить такую величину $U_{\text{УПР}}$, при котором будут отсутствовать нелинейные искажения выходного сигнала. Значения $U_{\text{УПР}}$ при открытии канала и при неискаженном $U_{\text{Н}}$ занести в отчет;

4. Установить $U_{\text{УПР}} = 10$ В. Используя закон Ома, вычислить сопротивление открытого канала. Полученное значение занести в отчет;

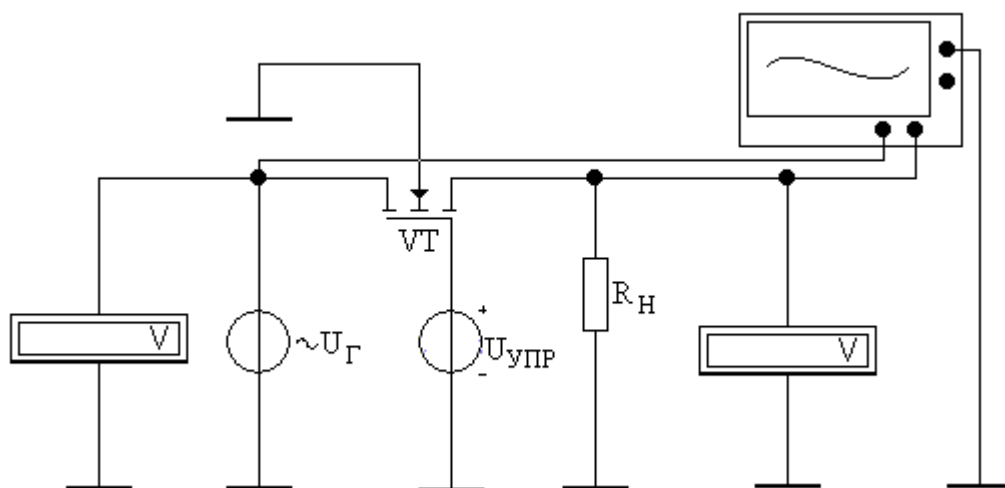


Рис.2.6. Схема моделирования схемы аналогового коммутатора

5. Снять частотную характеристику $K_U(f) = \frac{U_H(f)}{U_\Gamma}$ открытого ключа, для чего измерить U_H на частотах $f = 1\text{кГц}$, 10кГц , 100кГц , 1МГц , 10МГц и 100МГц . Значения f , U_H и K_U занести в таблицу. Определить граничную частоту $f_{ГР}$, на которой K_U составляет 0,707 от величины K_U на частоте $f = 1000\text{Гц}$.

В отчете представить:

- схему для исследования;
- осциллограммы сигналов на входе и выходе коммутатора по п.3;
- значения напряжения открытия и входного неискаженного сигнала;
- расчеты и значение сопротивления открытого канала;
- таблицу для построения и кривую частотной характеристики коммутатора;
- значение граничной частоты полосы пропускания.

Вопросы для самоконтроля

1. Влияет ли величина $U_{УПР}$ на сопротивление канала?
2. Почему уменьшаются нелинейные искажения при увеличении $U_{УПР}$?
3. Чем объясняется уменьшение $U_{ВЫХ}$ при повышении частоты?
4. Каковы причины искажений выходного напряжения при сильном входном сигнале?
5. Как определяется номер ножки на ИМС?
6. На какие ножки ИМС подается питание?
7. Какие должны быть параметры коммутируемого сигнала?
8. Чем отличаются между собой транзисторы в ИМС К176ЛП1?
9. Как называется режим транзистора, в котором он работает в качестве коммутатора?

3. ИССЛЕДОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Цель

1. Ознакомиться с характеристиками и параметрами операционных усилителей;
2. Изучить назначение, принцип действия, свойства и возможные схемотехнические решения устройств на операционных усилителях;
3. Приобрести навыки моделирования на ПК и исследования схем на основе операционных усилителей.

Учебные вопросы

- 3.1. Исследование схемы инвертирующего усилителя на лабораторном стенде;
- 3.2. Исследование схемы интегратора на лабораторном стенде;
- 3.3. Исследование схемы дифференциатора на лабораторном стенде;
- 3.4. Исследование схемы генератора на лабораторном стенде;
- 3.5. Компьютерное моделирование схем на основе операционных усилителей.

Литература для подготовки к занятию

1. Соколов С.В., Титов Е.В. Основы схемотехники. Ростов н/Д.: СКФ МТУСИ, 2010. – 210с.
2. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И., Аналоговая и цифровая электроника. - М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. - 768с.
3. Алиев И. И., Виртуальная электротехника. Компьютерные технологии в электротехнике и электронике. М.: РадиоСофт, 2003. – 240с.
4. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на Electronics Workbench и Vissim по элементам телекоммуникационных систем / В.И. Карлащук. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 480 с.: ил. – (Серия «Системы проектирования»).
5. Львов В.Л. Методическое пособие по применению программы Electronics Workbench для проведения лабораторных работ по дисциплинам кафедры систем передачи и обработки информации. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ, 2012. – 54 с.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. По каждому из заданий должны быть представлены название задания и те конкретные данные, которые указаны в задании.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Классификация ОУ.
2. Основные параметры и характеристики ОУ.
3. Понятие об идеальном ОУ.
4. Условия, при которых реальный ОУ можно считать идеальным.
5. Почему эти усилители называют операционными?
6. Области применения ОУ.

Краткие сведения из теории

Операционный усилитель (ОУ) в интегральном исполнении - это универсальная аналоговая микросхема, представляющая собой двухвходовый дифференциальный широкополосный усилитель постоянного тока, на выходе которого формируется сигнал, равный по величине усиленной разности входных сигналов. К настоящему времени сложилась типовая схема (рис.3.1), отвечающая следующим основным принципам схемотехники ОУ:

1. Основное усиление по напряжению должно быть сосредоточено в одном инвертирующем каскаде (на транзисторе VT7), охваченном емкостной отрицательной обратной связью;

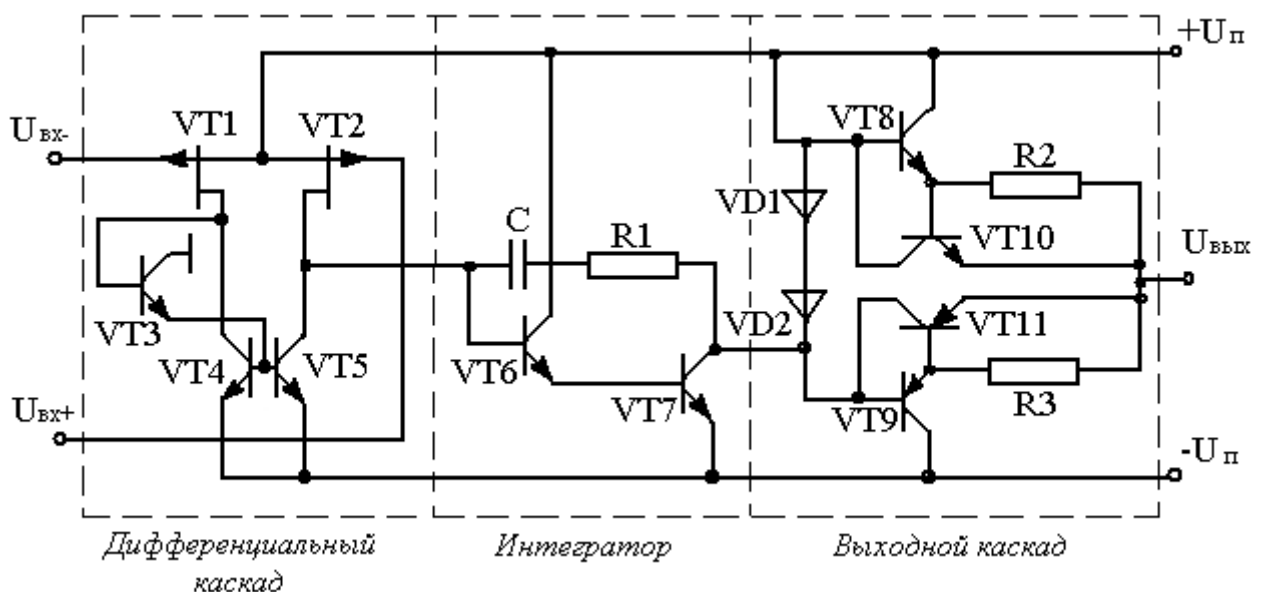


Рис.3.1. Принципиальная схема операционного усилителя

2. Первый каскад ОУ должен выполняться по схеме дифференциального каскада (ДК) с однофазным выходом для того, чтобы его выходной ток обеспечивал перезаряд интегрирующего конденсатора. Такое схемотехническое решение позволяет наиболее просто решить задачу согласования каскадов при сохранении практически идеальной симметрии режима работы плеч дифференциального каскада;

3. Выходной каскад ОУ должен обеспечивать высокую нагрузочную способность, широкий динамический диапазон выходного сигнала, малый уровень искажений. Поэтому его обычно выполняют по двухтактной схеме повторителя на комплементарных транзисторах с цепями защиты от перегрузок. Подключение повторителя к выходу интегратора облегчается тем, что источник тока нагрузки интегратора одновременно выполняет функции элемента, задающего ток через диоды смещения VD1 и VD2.

Операционным он назван потому, что предназначен для выполнения математических операций над входными сигналами при использовании его в электрической схеме с цепями внешней обратной связи.

Количество параметров, характеризующих ОУ, достигает нескольких десятков. К основным относятся:

- коэффициент усиления ОУ без обратной связи $K_{уи}$, Обычное значение $K_{уи}$ - несколько десятков сотен тысяч;

- коэффициент ослабления синфазных входных сигналов $K_{ос\ сф}$ - характеризует способность ОУ ослаблять (т.е. не усиливать) сигналы, приложенные одновременно к обоим входам. Как правило, $K_{ос\ сф}$ выражают в децибелах:

$$K_{ос\ сф} = 20 \lg (K_{уи} / K_{у\ сф});$$

- входное напряжение сдвига (смещения) – $U_{см}$. Это величина напряжения, которое необходимо подать на вход ОУ для того, чтобы напряжение на его выходе стало бы равно нулю. Этот параметр характеризует неидеальность ОУ и обусловлен неидентичностью транзисторов входного каскада. Типичное значение $U_{см}$ составляет от долей милливольт до десятков милливольт;

- входные токи – $I_{вх}$. Это токи, протекающие через входные выводы ОУ при нулевых входных напряжениях, обусловленные базовыми токами входных биполярных транзисторов, либо токами утечки затворов в случае использования полевых транзисторов во входном каскаде ОУ. Типичные значения $I_{вх}$ – от долей наноампер до десятков микроампер;

- разность входных токов - $\Delta I_{вх}$ может достигать 10...20% от $I_{вх}$. Она характеризует степень неидентичности транзисторов входного каскада ОУ;

- скорость нарастания выходного напряжения $U_{н\ вых}$ - отношение изменения $U_{вых}$ в пределах 10% - 90% от своего номинального значения ко времени, за которое произошло это изменение. Параметр характеризует скорость отклика ОУ на ступенчатое изменение входного сигнала;

- частота единичного усиления f_l - значение частоты входного сигнала, при котором значение коэффициента усиления ОУ по напряжению падает до единицы. Данный параметр определяет максимально реализуемую полосу усиления ОУ.

Варианты условных графических обозначений ОУ и назначения выводов приведены на рис.3.2. а, б:

1 - неинвертирующий вход ОУ;

2 - инвертирующий вход ОУ;

3, 4 - выводы для подключения внешних элементов коррекции амплитудно-частотной характеристики;

5, 6 - выводы для подключения внешних элементов балансировки;

7 - выход ОУ;

8- вывод для подключения источника питания положительной полярности;

9- вывод для подключения источника питания отрицательной полярности;

10- вывод для соединения с общей шиной (нулевым потенциалом) схемы.

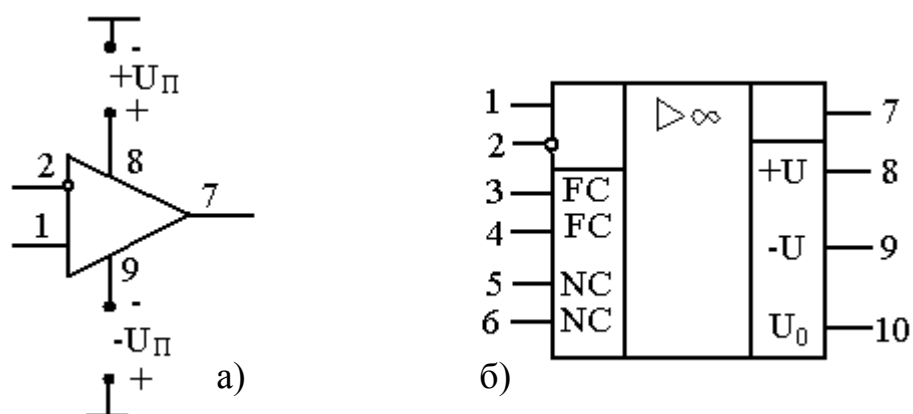


Рис.3.2. Варианты эквивалентных УГО ОУ

Обратите внимание, что для питания ОУ используются два источника $-U_{\Pi}$ и $+U_{\Pi}$. Кроме того, следует иметь в виду, что ОУ, не имеющие внутренней коррекции частотной характеристики, без элементов внешней коррекции самовозбуждаются. Инвертирующий вход обозначается кружочком либо знаком "минус", неинвертирующий вход обозначается знаком "плюс".

Универсальность ОУ позволяет путем изменения схемы цепи обратной связи (ОС) строить на его основе различные устройства: усилители (с инверсией фазы входного сигнала или без инверсии); фильтры (полосовой, верхних или нижних частот); генераторы сигналов (гармонических, релаксационных или сигналов специальной формы); интегрирующие или дифференцирующие устройства; преобразователи аналоговых сигналов, компараторы и другие устройства. При этом вид выполняемого преобразования определяется исключительно внешними элементами, а от параметров самого ОУ зависит только точность преобразования. Для иллюстрации этого многообразия ниже приводятся примеры включений ОУ в безынерционные линейные цепи (рис.3.3 – 3.5); в безынерционные нелинейные цепи (рис.3.6, 3.7); в инерционные линейные цепи (рис.3.8)

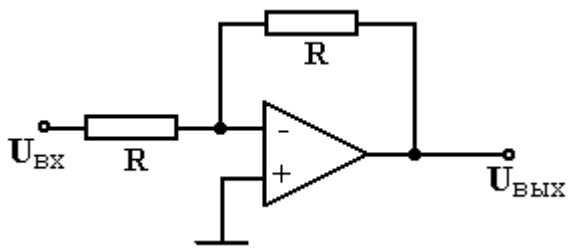


Рис.3.3. Инвертирующий усилитель

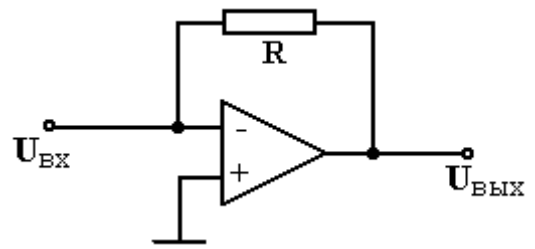


Рис.3.4. Преобразователь ток-напряжение

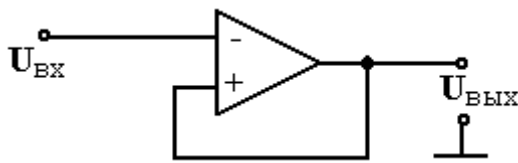


Рис.3.5. Повторитель напряжения

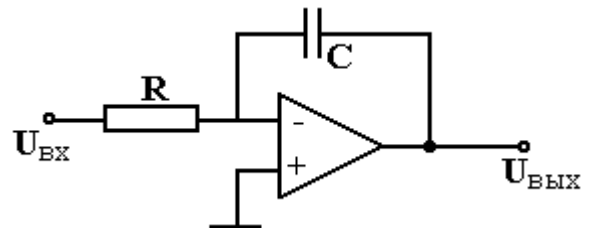


Рис.3.6. Интегратор

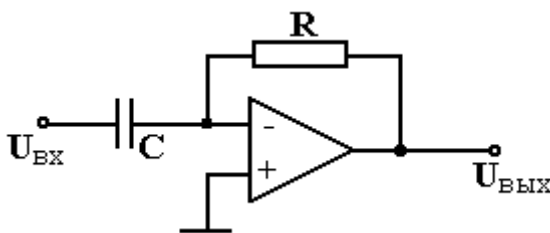


Рис.3.7. Дифференциатор

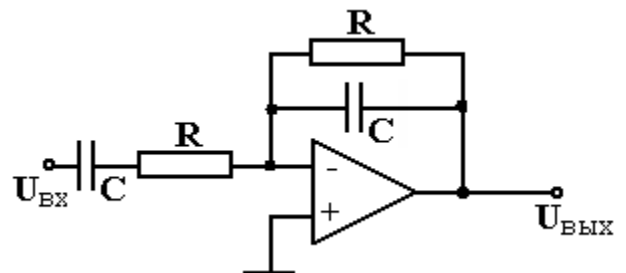


Рис.3.8. Активный RC фильтр

Задание 3.1. Исследование схемы инвертирующего усилителя на лабораторном стенде

Работа выполняется на лабораторной установке "Электронные приборы". Расположение выводов и схемы коррекции исследуемого ОУ К140УД20 приведены на рис.3.9 (цифры в скобках относятся ко второму ОУ):

- 1(7) – инвертирующий вход ОУ;
- 2(6) – неинвертирующий вход ОУ;
- 4 – вывод для подключения источника $-U_{\text{п}}$;
- 12(10) – выход ОУ;
- 13(9) – вывод для подключения источника $+U_{\text{п}}$;

Для ОУ К553УД2 (КР1408УД1) назначение выводов (рис.3.10):

- 4 – инвертирующий вход ОУ;
- 5 – неинвертирующий вход ОУ;
- 6 – вывод для подключения источника $-U_{\text{п}}$;
- 10 – выход ОУ;

- 11 – вывод для подключения источника $+U_{\Pi}$;
 - 3, 12 – выводы для подключения цепей внешней частотной коррекции ОУ (должна быть включена в любой схеме на основе ОУ, но может быть не показана на принципиальной схеме).

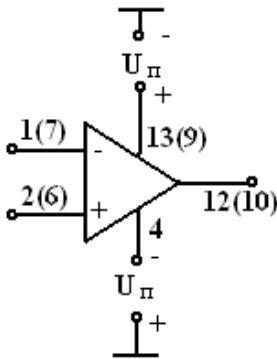


Рис.3.9. Сдвоенный
операционный усилитель
К140УД20

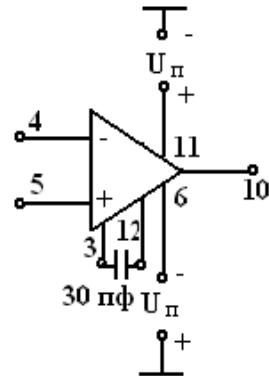


Рис.3.10. ОУ К553УД2
(КР1408УД1)

Основные параметры исследуемых ОУ приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Основные параметры исследуемых ОУ

Тип ОУ	$K_y U_{10^3}$	U_{CM} мВ	I_{BX} мкА	f_1 МГц	$U_{V_{BXX}}$ В/мкс	K_{OC} сф дБ	U_{BX} В	U_{Π} В
К553УД2	20	7,5	1,5	1	0,5	70	10	6 – 15
К140УД20	50	5	0,2	0,5	0,3	70	12	6 – 15

Порядок исследования:

1. Собрать схему инвертирующего усилителя (рис.3.11). На схеме цепь коррекции не показана, но при сборке схемы она должна быть. К выводам U_{BX} и $U_{ВЫХ}$ подключить осциллограф. Установить значения $E1 = E2 = 10 В$, $C1 = 1 мкФ$, $R1 = 100 Ом$, $R2 = 1 кОм$. Занести схему в отчет, схемы коррекции и выписать значения предельных параметров;

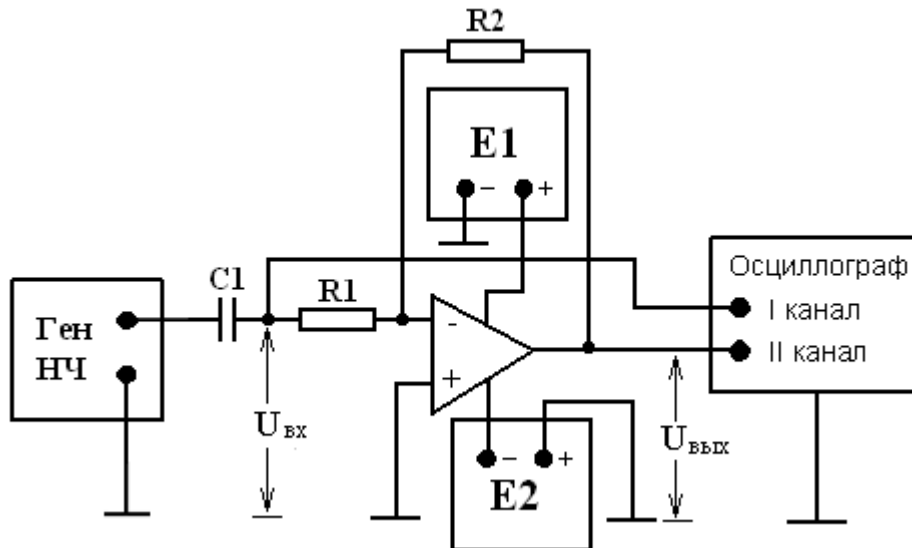


Рис.3.11. Схема исследования инвертирующего усилителя

2. С выхода генератора подать на инвертирующий вход ОУ сигнал $U_{\text{вх}} = 50 \text{ мВ}$ с частотой 1 кГц ;

3. Амплитуды сигналов $U_{\text{вх}}$ и $U_{\text{вых}}$ измерить с помощью осциллографа. Рассчитать экспериментальный коэффициент усиления:

$$K_{\text{уэксп}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Сделать вывод о фазе входного и выходного сигналов. Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов;

4. Для данной схемы рассчитать теоретический коэффициент усиления по формуле

$$K_{\text{утеор}} = \frac{R2}{R1}$$

5. Повторить измерения и расчеты по пп.3 и 4 при $R2 = 10 \text{ кОм}$. При этом входной сигнал необходимо уменьшить до 10 мВ . Сделать вывод об изменении величины коэффициента усиления усилителя.

В отчете представить:

- схему принципиальную электрическую для исследования;
- осциллограммы сигналов на входе и выходе усилителя;
- вывод о фазе выходного сигнала инвертирующего усилителя;
- расчеты и значения расчетного и теоретического коэффициентов усиления;
- вывод о параметрах, влияющих на коэффициент усиления усилителя.

Задание 3.2. Исследование схемы интегратора на лабораторном стенде

Порядок исследования:

1. Собрать схему интегратора (рис.3.12). Источники питания и цепь коррекции на схеме не показаны, но при сборке схемы они должны быть. К входу и выходу схемы подключить осциллограф. Установить значения $E1 = E2 = 10\text{ В}$, $C1 = 1\text{ мкФ}$, $R1 = 1\text{ кОм}$, $C2 = 68\text{ нФ}$, $R2 = 75\text{ кОм}$;

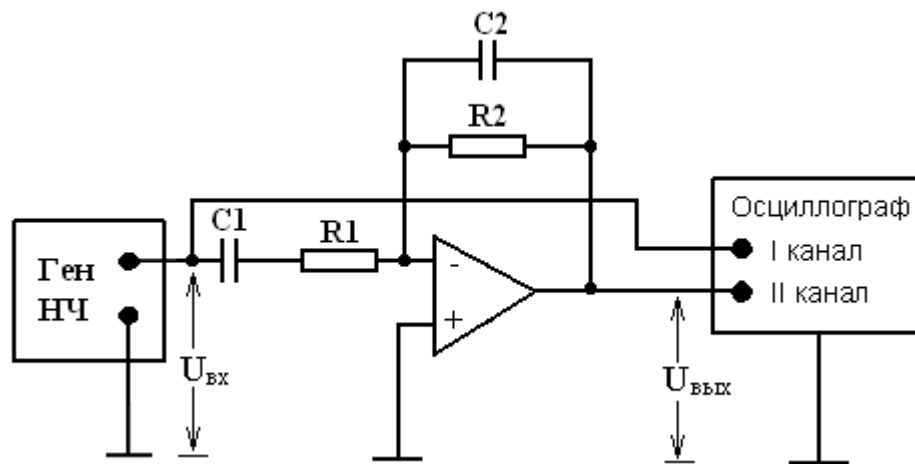


Рис.3.12. Схема исследования интегратора

2. Генератор НЧ перевести в режим генерации прямоугольных импульсов. Подать на вход схемы от генератора прямоугольных импульсов сигнал с амплитудой 100 мВ и частотой 100 Гц. Измерение амплитуды входного сигнала проводить с помощью осциллографа. Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов;

3. Повторить исследование на частоте 300 Гц. Зарисовать осциллограммы. Сделать вывод о реализации функции интегрирования, выделить ее графическое представление на диаграмме.

В отчете представить:

- схему принципиальную электрическую для исследования;
- осциллограммы сигналов на входе и выходе усилителя;
- вывод о реализации функции интегрирования;
- графическое отображение функции интегрирования.

Задание 3.3. Исследование схемы дифференциатора на лабораторном стенде

Порядок исследования:

1. Собрать схему дифференциатора (рис.3.13). Источники питания и цепь коррекции на схеме не показаны, но при сборке схемы они должны быть. К входу и выходу схемы подключить осциллограф. Установить значения $E1 = E2 = 10\text{ В}$, $C = 68\text{ нФ}$, $R1 = 1\text{ кОм}$, $R2 = 75\text{ кОм}$;

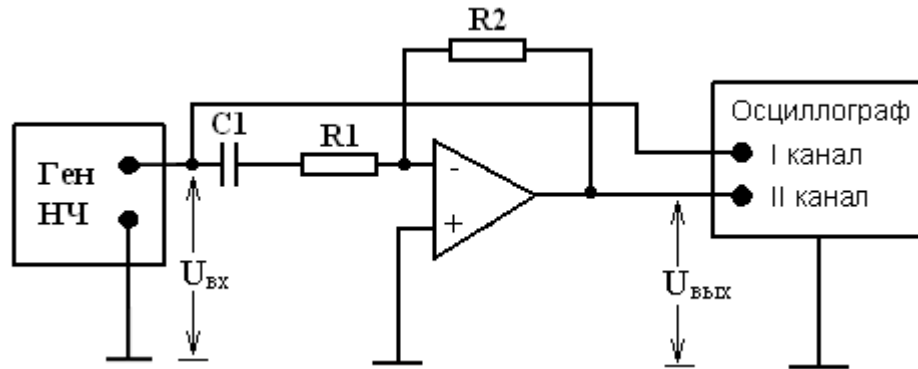


Рис.3.13. Схема исследования дифференциатора

2. Генератор НЧ перевести в режим генерации прямоугольных импульсов. Подать на вход схемы от генератора прямоугольных импульсов сигнал с амплитудой 200 мВ и частотой 100 Гц. Измерение амплитуды входного сигнала проводить с помощью осциллографа. Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов;

3. Повторить исследование на частоте 500 Гц. Зарисовать осциллограммы. Сделать вывод о реализации функции дифференцирования, выделить ее графическое представление на диаграмме.

В отчете представить:

- схему принципиальную электрическую для исследования;
- осциллограммы сигналов на входе и выходе усилителя;
- вывод о реализации функции дифференцирования;
- графическое отображение функции дифференцирования.

Задание 3.4. Исследование схемы генератора на лабораторном стенде

1. Собрать схему релаксационного генератора (рис.3.14). Источники питания и цепь коррекции на схеме не показаны, но при сборке схемы они должны быть. Установить значения $E1 = E2 = 10\text{ В}$, $C1 = 0,05\text{ мкФ}$, $R1 = R2 = R3 = 10\text{ кОм}$;

2. Подключить второй вход осциллографа к выходу схемы, а первый вход подключить к точке 1. Зарисовать осциллограммы – выходную и в точке 1;

3. Подключить первый вход осциллографа к точке 2 схемы и зарисовать осциллограмму в этой точке. Эти три осциллограммы разместить друг под другом;

4. Измерить с помощью осциллографа период и рассчитать частоту колебаний генератора. Расчеты и результаты занести в отчет.

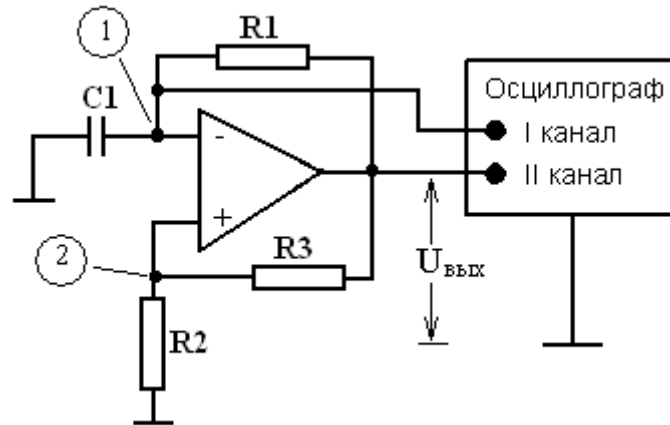


Рис.3.14. Схема исследования релаксационного генератора

В отчете представить:

- схему принципиальную электрическую для исследования;
- осциллограммы сигналов на входе и выходе усилителя по пп. 3 и 4;
- расчеты и результаты вычисления частоты и периода колебаний.

Задание 3.5 Компьютерное моделирование схем на основе операционных усилителей

3.5.1. Исследование инвертирующего усилителя на ОУ.

1. Построить схему на экране монитора компьютера в среде Electronics Workbench (рис.3.15). Допускается использование иной среды моделирования. В качестве активного элемента использовать пятивыводной ОУ модели 741 из библиотеки default или LM1877 из библиотеки lm (по указанию преподавателя). Вольтметры переключить в режим измерения переменного напряжения "АС";

2. Включить схему, измерить напряжения U_{Γ} и $U_{ВЫХ}$ и рассчитать K_{ν} по формуле:

$$K_{\nu} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{\Gamma}}$$

3. На осциллографе убедиться, что входной и выходной сигналы находятся в противофазе;

4. Изменить значение сопротивления обратной связи на 10 кОм. Повторить измерения и расчеты по п.2.

В отчете представить:

- схему моделирования для исследования;
- вывод о соотношении фаз входного и выходного сигналов;
- расчеты и результаты вычисления коэффициентов усиления по п.2 и 4;
- вывод о параметрах, влияющих на коэффициент усиления усилителя.

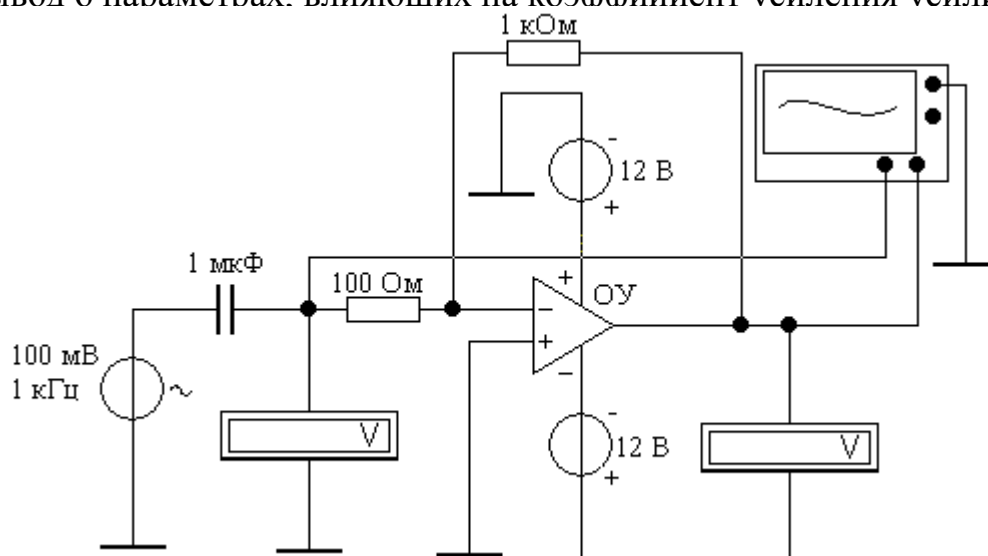


Рис.3.15 . Схема моделирования инвертирующего усилителя

3.5.2. Исследование дифференциатора на ОУ.

1. Построить схему на экране монитора компьютера в среде Electronics Workbench (рис.3.16). Допускается использование иной среды моделирования. В качестве активного элемента использовать пятивыводной ОУ модели 741 из библиотеки default или LM1877 из библиотеки lm (по указанию преподавателя). Схему занести в отчет;

2. Включить схему, зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов;

3. Установить частоту генератора прямоугольных импульсов 300 Гц. Повторить исследование п. 2;

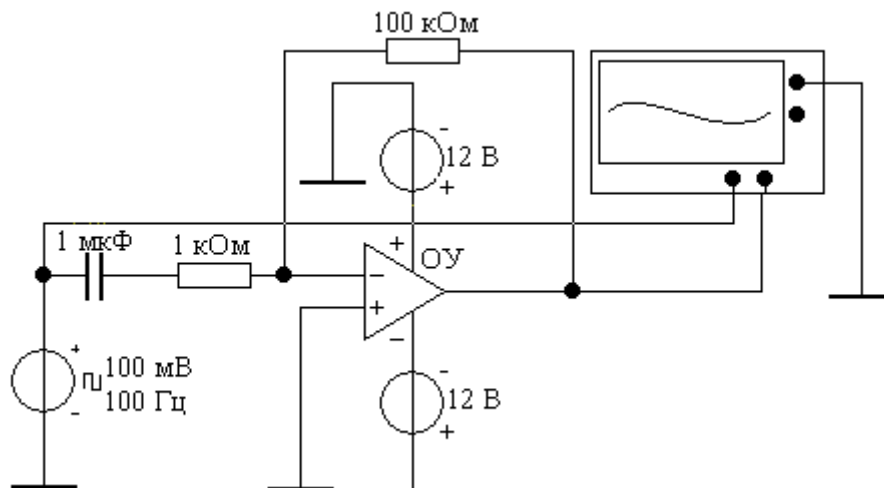


Рис.3.16. Схема моделирования дифференциатора

В отчете представить:

- схему моделирования для исследования;
- осциллограммы входного и выходных сигналов по пп. 2 и 3;
- обозначение участка диаграммы, отображающего процесс дифференцирования;
- вывод о влиянии частоты сигнала на характер выходной кривой, отображающей процесс дифференцирования.

3.5.3. Исследование интегратора на ОУ.

1. Построить схему на экране монитора компьютера в среде Electronics Workbench (рис.3.17). Допускается использование иной среды моделирования. В качестве активного элемента использовать пятивыводной ОУ модели 741 из библиотеки default или LM1877 из библиотеки lm (по указанию преподавателя);

2. Включить схему, зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов;

3. Установить частоту генератора прямоугольных импульсов 300 Гц. Повторить исследование по п. 2.

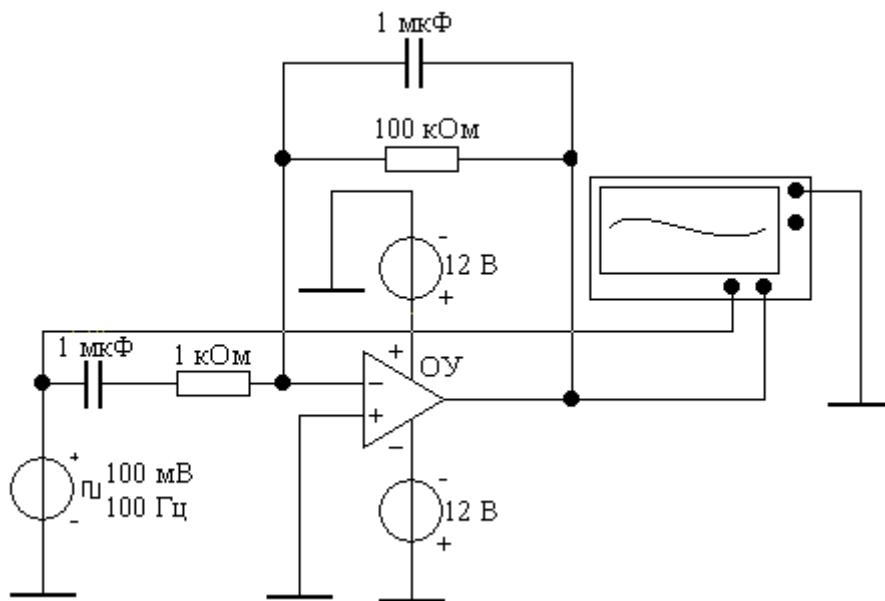


Рис.3.17. Схема моделирования интегратора

В отчете представить:

- схему моделирования для исследования;
- осциллограммы входного и выходных сигналов по пп. 2 и 3;
- обозначение участка диаграммы, отображающего процесс интегрирования;
- вывод о влиянии частоты сигнала на характер выходной кривой, отображающей процесс интегрирования.

3.5.4. Исследование релаксационного генератора на ОУ.

1. Построить схему на экране монитора компьютера в среде Electronics Workbench (рис.3.18). Допускается использование иной среды моделирования. В качестве активного элемента использовать пятивыводной ОУ модели 741 из библиотеки default или LM1877 из библиотеки lm (по указанию преподавателя);

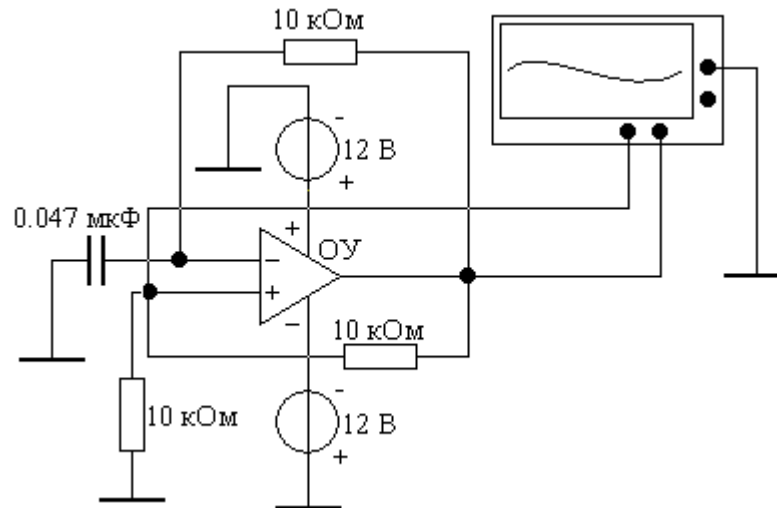


Рис.3.18. Схема моделирования релаксационного генератора

2. Зарисовать выходную осциллограмму генератора;
3. Измерить с помощью осциллографа период и рассчитать частоту колебаний генератора;
4. Изменить величину емкости на входе ОУ и снять выходную осциллограмму. Сделать вывод о характере влияния емкости на работу генератора;
5. Выполнить операции аналогичные п.4 по отношению к резистору обратной связи.

В отчете представить:

- схему моделирования для исследования;
- осциллограммы входного и выходных сигналов по п.3;
- расчеты и результаты вычисления частоты и периода выходного сигнала по п.3;
- вывод о влиянии емкости и резистора на характер генерации.

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое операционный усилитель? Каково их назначение?
2. Почему эти усилители называют операционными?

3. Назовите основные параметры ОУ.
4. Чем определяется коэффициент усиления инвертирующего усилителя на ОУ?
5. При каких условиях схема на ОУ называется дифференциатором?
6. При каких условиях схема на ОУ называется интегратором?
7. Что такое релаксационный генератор? Расскажите о его назначении.
8. Нарисуйте схему компаратора на ОУ. Пояснить принцип его работы.
9. Какие элементы из усилителя создают генератор?
10. Каковы условия генерации?
11. В чем заключаются достоинства ОУ, благодаря которым они широко используются на практике?

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОМПАРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель

1. Изучить типы, характеристики и параметры компараторов;
2. Исследовать схемы компараторов на лабораторном стенде;
3. Научиться моделировать схемы различных типов компараторов с помощью программ Electronic Workbench.

Учебные вопросы

- 4.1. Исследование аналогового компаратора на лабораторном стенде;
- 4.2. Исследование схемы компаратора с опорным напряжением с помощью компьютерного моделирования;
- 4.3. Исследование схемы компаратора с гистерезисом с помощью компьютерного моделирования.

Литература для подготовки к занятию

1. Соколов С.В., Титов Е.В. Основы схемотехники. Ростов н/Д.: СКФ МТУСИ, 2010. – 210с.
2. Павлов В. Н, Ногин В. Н., Схемотехника аналоговых электронных устройств. Для высших учебных заведений. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 320с.
3. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И., Аналоговая и цифровая электроника. - М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. - 768с.
4. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench / Под ред. Д.И.Панфилова. - М.: Додэка, 1999.
5. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на Electronics Workbench и Vissim по элементам телекоммуникационных систем / В.И. Карлащук. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 480 с.: ил. – (Серия «Системы проектирования»).
6. Львов В.Л. Методическое пособие по применению программы Electronics Workbench для проведения лабораторных работ по дисциплинам кафедры систем передачи и обработки информации. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ, 2012. – 54 с.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. По каждому из заданий должны быть представлены название задания и те конкретные данные, которые указаны в задании.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Классификация компараторов.
2. Основные параметры и характеристики компараторов.
3. Достоинства и недостатки компаратора с гистерезисом.

4. Области применения компараторов.

Краткие сведения из теории

Компараторами называются устройства сравнения значений двух аналоговых сигналов. Входные аналоговые сигналы компаратора: $U_{вх}$ - анализируемый сигнал и $U_{оп}$ - опорный сигнал для сравнения. Результаты сравнения в простейшем случае индицируются различными уровнями выходных напряжений. Для компараторов в интегральном исполнении эти уровни соответствуют логическим уровням нуля и единицы для различных логик.

$$U_{вых} = \begin{cases} U_{вых}^1 & \text{при } U_{вх} - U_{оп} \\ U_{вых}^0 & \text{при } U_{вх} - U_{оп} \end{cases} \quad (4.1)$$

Таким образом, компаратор - это элемент перехода от аналоговых к цифровым сигналам, поэтому его иногда называют однобитным аналого-цифровым преобразователем

Нуль – компаратор

Одна из возможных схем нуль-компаратора на операционном усилителе изображена на рис.4.1.

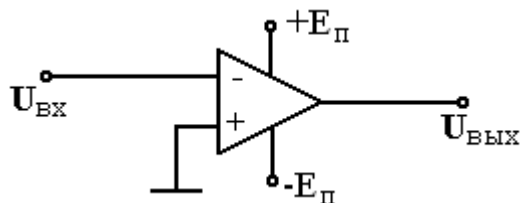


Рис.4.1. Нуль-компаратор на ОУ

Известно, что если операционный усилитель имеет конечное значение дифференциального коэффициента усиления, то его амплитудная характеристика выглядит следующим образом (рис4.2,а).

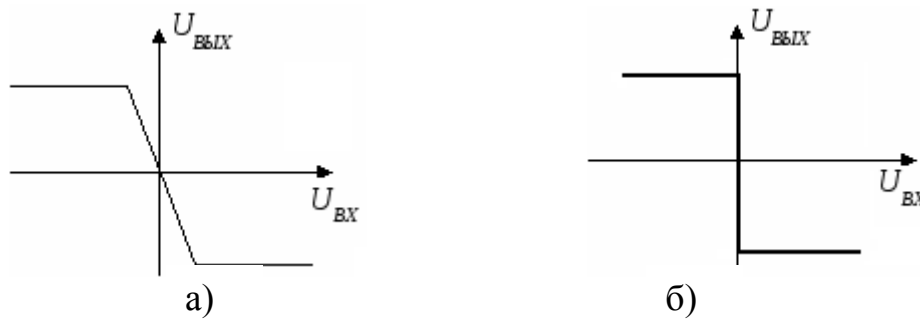


Рис.4.2. Амплитудная характеристика ОУ для двухполярного симметричного питания: типичный вид (а) и идеализированная (б)

Протяженность линейного участка на амплитудной характеристике чрезвычайно мала. Так при усилении ОУ, равному 100000, и ограничению на уровне 10В ширина его равна всего лишь 200 микровольт. Легко видеть, что при увеличении коэффициента усиления этот участок еще суживается, а для идеализированного ОУ, у которого усиление стремится к бесконечности ширина его стремится к нулю. Последнее означает, что переключение такого усилителя будет происходить при нулевом дифференциальном входном напряжении, и мы имеем схему нуль-компаратора, характеристика которого показана на рис.4.2,б.

Если подать на вход компаратора синусоидальный сигнал, то на его выходе будет сформировано прямоугольное знакопеременное напряжение – рис.4.3.

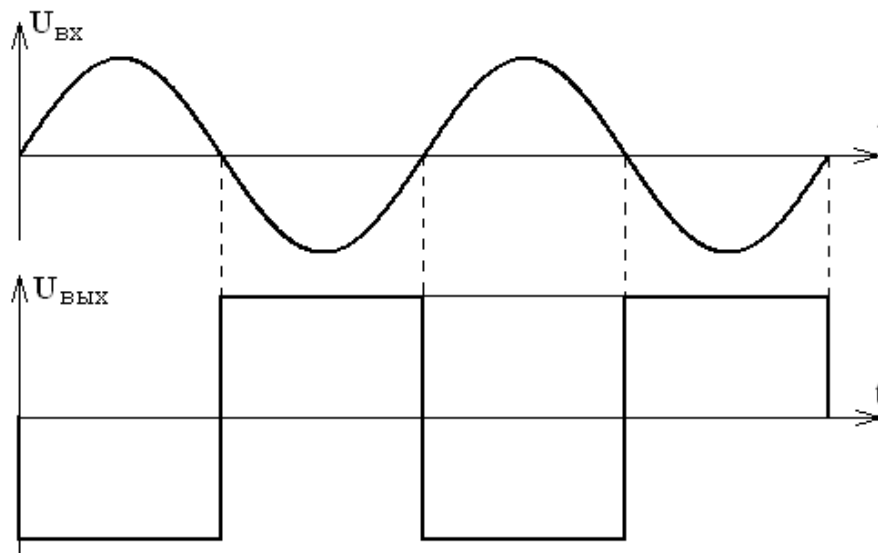


Рис.4.3. Временные диаграммы сигналов нуль-компаратора

Так как входной сигнал подается на инвертирующий вход, то выходной сигнал будет инвертирован. Такие графики справедливы только в идеальном

случае, когда ОУ имеет бесконечно большое значение скорости нарастания. В реальной схеме фронты прямоугольных импульсов будут иметь конечное время установления.

Естественно, что преобразовательная характеристика нуль-компаратора будет меняться, если поменять местами входы ОУ.

Компараторы с ненулевым опорным напряжением

Преобразовательная характеристика компаратора будет изменена, если на один из входов ОУ подать опорное напряжение той или иной полярности.

Например, если в схеме компаратора (рис.4.4,а) на неинвертирующий вход относительно земли подать опорное напряжение положительной полярности, то переключение выходного напряжения будет происходить также при ненулевом дифференциальном входном сигнале ОУ, т. е. при входном напряжении компаратора, равном значению $U_{оп}$.

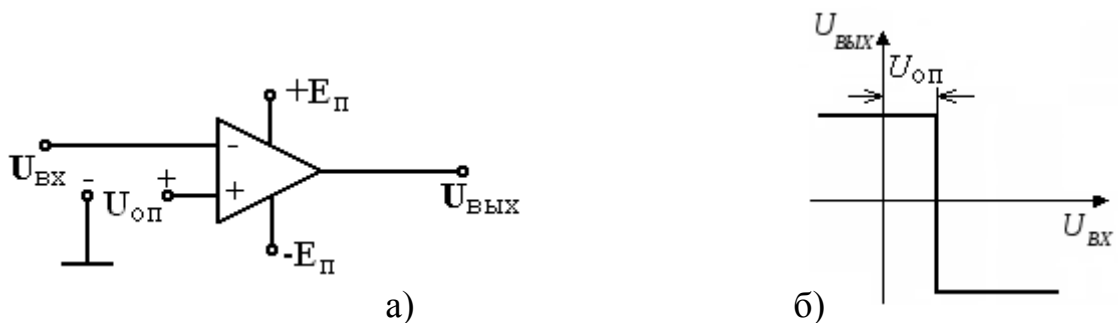


Рис.4.4. Схема компаратора на ОУ с ненулевым опорным напряжением (а) и его амплитудная характеристика (б)

При этом амплитудная характеристика такого компаратора сместится вправо (рис.4.4,б).

Графики входного и выходного напряжений компаратора на ОУ с ненулевым опорным напряжением представлены на рис.4.5.

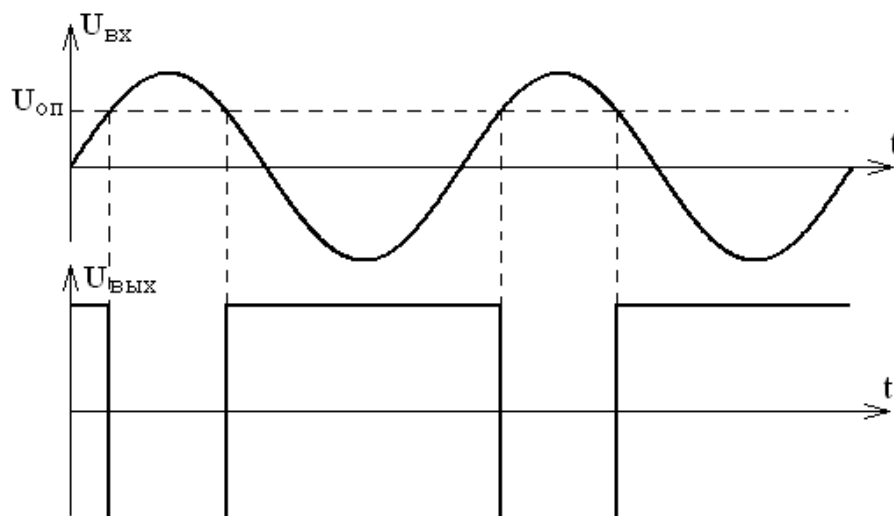


Рис.4.5. Временные диаграммы сигналов компаратора с опорным напряжением

Из рисунка ясно, что при синусоидальном входном напряжении на выходе образуется сигнал прямоугольной формы, но с разными длительностями участков положительной и отрицательной полярности.

Компараторы с гистерезисом

Компараторы с гистерезисом в литературе еще называются компараторами с защелкой. При неизменном опорном напряжении во всех выше обозначенных схемах компараторов малейшие изменения входного напряжения под действием помех в окрестностях значения опорного напряжения будут приводить к многочисленным изменениям сигнала на выходе (такое явление называют - "дребезг"), что плохо сказывается на работе последующих логических схем.

Для устранения этого явления обычно вводят положительную обратную связь, которая обеспечивает переходной характеристике компаратора гистерезис. Делается это для того, чтобы компаратор приняв решение, например, о превышении входного напряжения относительно опорного, не менял бы его, если входное напряжение стало бы меньше опорного на определенное пользователем значение. Схема компаратора с положительной обратной связью приведена на рис.4.6,а.

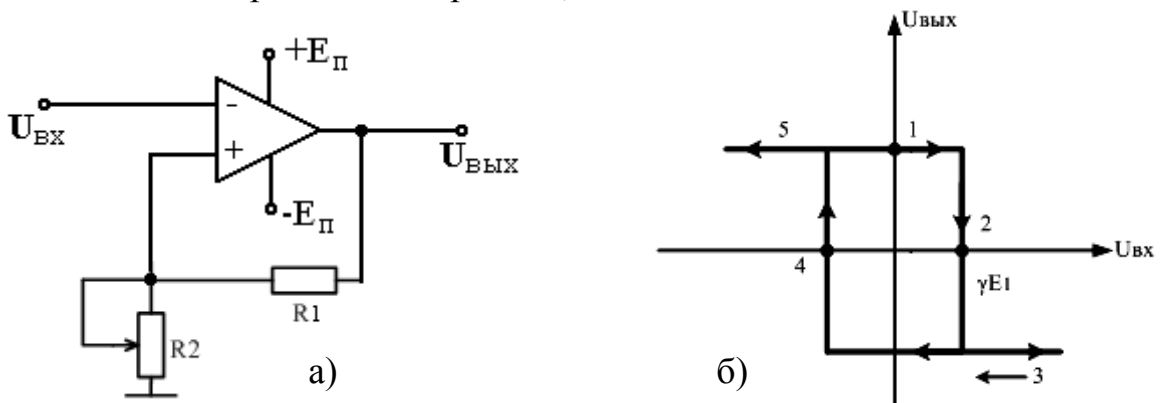


Рис.4.6. Схема компаратора с положительной обратной связью (а) и его амплитудная характеристика с гистерезисом (б)

Амплитудная характеристика компаратора с положительной обратной связью (гистерезисом) представлена на рис.4.6,б.

Пояснить работу такой схемы можно следующим образом. Пусть при включении питания схемы за счет переходного (регенеративного) процесса из-за наличия положительной связи на выходе ОУ установится напряжение, близкое к значению $+E_{\text{П}}$. Тогда с учетом передачи по напряжению цепи обратной связи через делитель R_1 и R_2 на неинвертирующем входе ОУ установится напряжение, например, 1В. При нулевом входном напряжении схема поддерживает указанное выше выходное напряжение, близкое к $+E_{\text{П}}$ (точка 1).

При увеличении входного напряжения компаратора положительной полярности переключение выходного напряжения на уровень, близкий по значению к $-E_n$, произойдет при $U_{вх} = 1В$ (точка 2), когда дифференциальная составляющая входного напряжения ОУ станет равной нулю. Дальнейшее повышение входного напряжения компаратора не приведет к изменениям выходного напряжения (зона 3). Как только на выходе схемы установится отрицательное напряжение, то на инвертирующем входе ОУ будет действовать напряжение $-1В$. Последнее означает, что область 3 продолжится до входного напряжения $-1В$, при котором компаратор сработает (точка 4), и его выходное напряжение вновь станет положительным и близким к значению $+E_n$ (зона 5). Дальнейшее уменьшение, а затем и увеличение входного напряжения компаратора не приведет к изменению его выходного напряжения (зона 5). Компаратор вновь сработает, когда дифференциальная составляющая входного напряжения ОУ станет равной нулю, что произойдет при входном напряжении компаратора $1В$.

Указанные рассуждения подтверждают, что на амплитудной характеристике действительно присутствует гистерезис, в данном примере шириной в $2В$, характеризующийся неоднозначностью установки выходного напряжения от значения входного напряжения в зоне гистерезиса, т. е. зависимостью уровня выхода от предыстории работы схемы.

При подаче на вход компаратора с гистерезисом гармонического сигнала диаграммы входного и выходного сигналов будут иметь вид (рис.4.7).

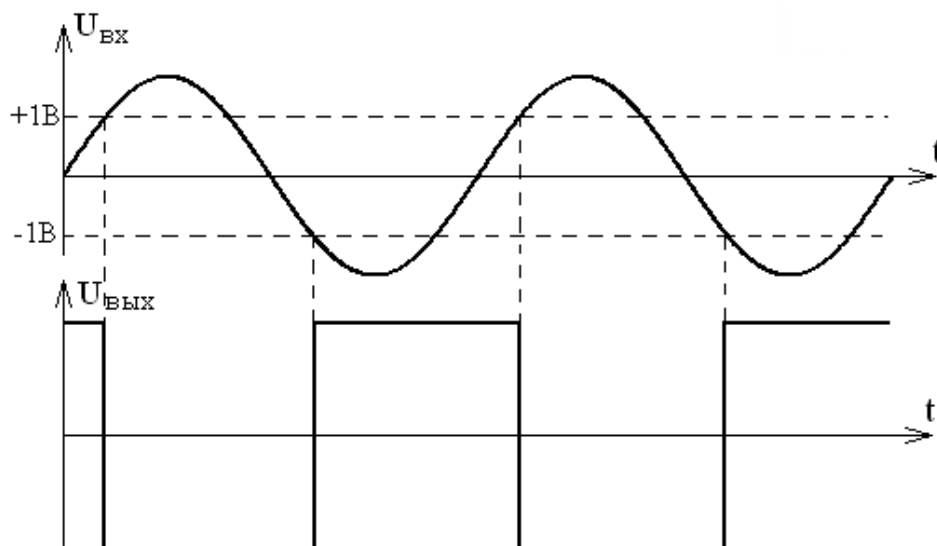


Рис.4.7. Временные диаграммы сигналов компаратора с гистерезисом

Наличие гистерезиса хотя и вызывает некоторую задержку в переключении компаратора, но существенно уменьшает или даже устраняет дребезг выходного сигнала.

Задание 4.1. Исследование аналогового компаратора на лабораторном стенде

Работа выполняется на лабораторной установке "Электронные приборы". В лабораторной работе в качестве компаратора используется операционный усилитель К140УД20 или К553УД2. Расположение выводов, схемы коррекции и электрические параметры ОУ приведены в разделе 7 рис.7.9 и 7.10.

Схема исследования компаратора напряжения представлена на рис.4.8. В этой схеме через разделительный конденсатор $C1$ от генератора низкой частоты на инвертирующий вход ОУ подается синусоидальное напряжение. Величина этого напряжения $U_{вх}$ измеряется осциллографом (канал 1).

На неинвертирующий вход ОУ подается опорное напряжение $U_{оп}$, величина которого регулируется потенциометром $R2$ и измеряется цифровым вольтметром мультиметра ($V2$), включенным на режим измерения постоянного напряжения. К клеммам $U_{вз}$ и $U_{вых}$ подключается осциллограф.

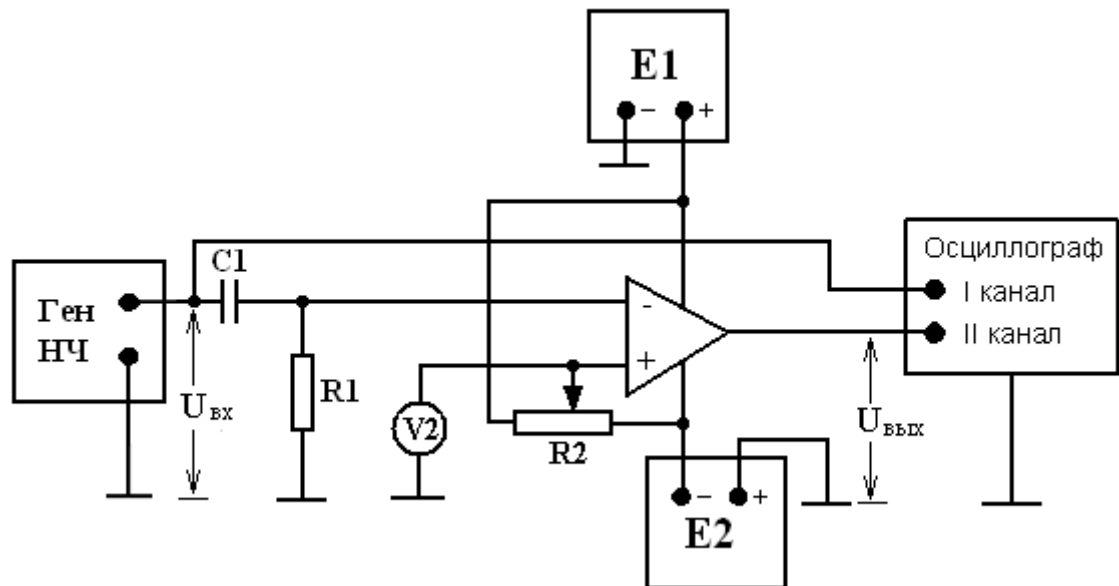


Рис.4.8. Схема исследования компаратора напряжения на ОУ

Диаграммы входного и выходного напряжения наблюдаются на экране осциллографа. Выходной сигнал имеет форму импульсов. Когда $U_{вх} < U_{оп}$, то потенциал выхода высокий, он равен U^1 . Когда $U_{вх} > U_{оп}$, то потенциал выхода низкий, он равен U^0 . Совмещая осциллограммы входного и выходного напряжений, можно определить порог срабатывания схемы (см. рис.4.9).

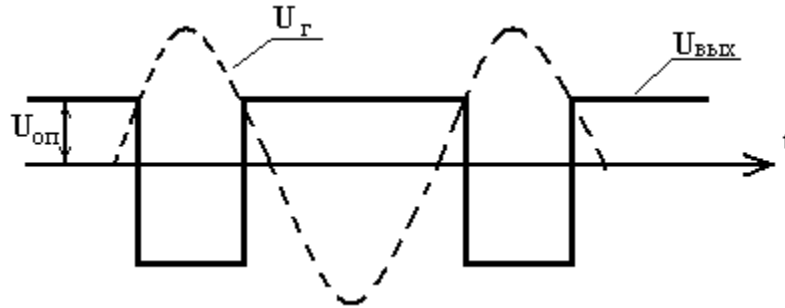


Рис.4.9. Совмещенные диаграммы входного и выходного сигналов компаратора на ОУ

Порядок исследований:

1. Собрать схему (рис.4.8). Установить на схеме $E1 = E2 = 10\text{В}$, $C1 = 0,05\text{ мкф}$, $R1 = 75\text{ кОм}$, $R2$ – потенциометр с сопротивлением 47 кОм . Схему занести в отчет;

2. Подать на вход схемы напряжение от звукового генератора с амплитудой 5В и частотой 1 кГц и получить на экране осциллографа устойчивое изображение синусоиды;

3. Потенциометром $R2$ установить напряжение на неинвертирующем входе ОУ $U_{оп} = 0\text{В}$. Зарисовать входную и выходную осциллограммы;

4. Потенциометром $R2$ установить напряжение на неинвертирующем входе ОУ $U_{оп} = 2,5\text{В}$. Зарисовать выходную осциллограмму ниже осциллограммами п. 2;

5. Повторить п. 4 для $U_{оп} = -2,5\text{ В}$. Измерить длительности положительного и отрицательного импульсов выходного сигнала. Результаты занести в отчет;

6. Для $U_{оп} = -2,5\text{В}$ совместить на экране осциллографа входную и выходную осциллограммы так, как показано на рис.4.9. Определить порог срабатывания ОУ;

7. Установить $U_{оп} = 2\text{В}$ и, уменьшая напряжение генератора, определить минимальное входное напряжение, при котором компаратор работает. Это значение напряжения занести в отчет.

В отчете представить:

- схему принципиальную электрическую для исследования;
- осциллограммы сигналов для опорного напряжения $-2,5\text{В}$, 0В , $+2,5\text{В}$;
- величину порога срабатывания компаратора; Сделать вывод о способе изменения порога срабатывания;
- величину входного напряжения срабатывания компаратора. Сделать вывод о факторах, влияющих на эту величину.

Задание 4.2. Исследование схемы компаратора с опорным напряжением с помощью компьютерного моделирования

Последовательность исследования:

1. Построить схему на экране монитора компьютера в среде Electronics Workbench (рис.4.10). Допускается использование иной среды моделирования. В качестве активного элемента использовать пятивыводной ОУ модели 741 из библиотеки **default** или LM1877 из библиотеки **lm** (по указанию преподавателя). Установить для переменного резистора (рис.4.11):

- величину сопротивления (Resistance) – 57 кОм;
- клавишу управления сопротивлением (Key), например, W;
- переключения (Increment) - 2%. Схему занести в отчет;

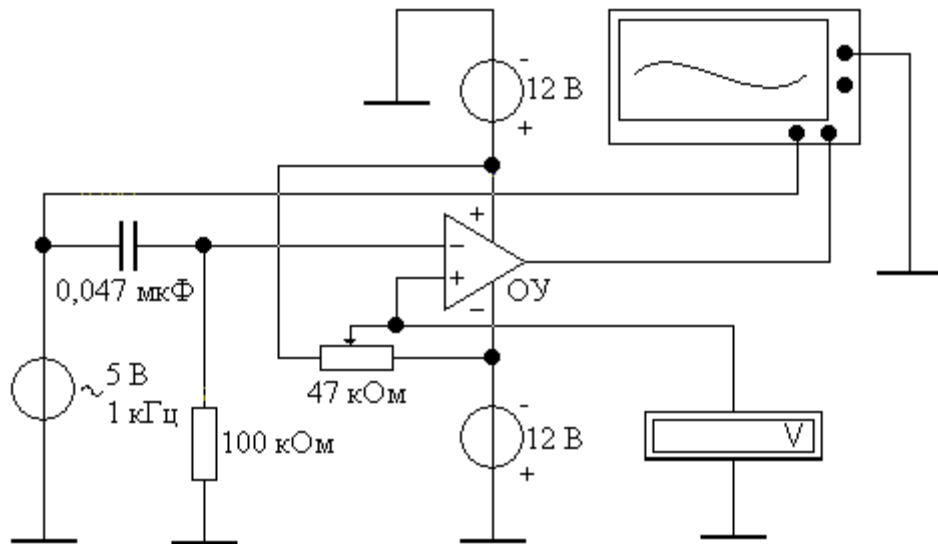


Рис.4.10. Схема исследования компаратора с опорным напряжением на ПК

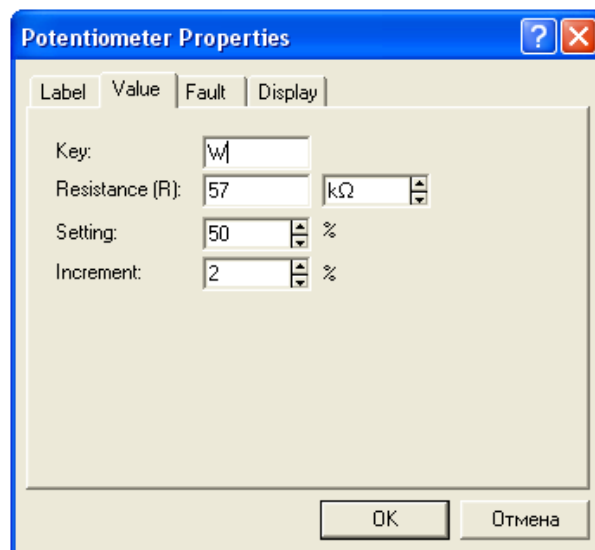


рис.4.11. Меню установки параметров потенциометра

2. Включить схему, выделить потенциометр и, нажимая клавишу W, переключать переменный резистор в сторону уменьшения, либо нажимая на клавиши Shift + W, переключать переменный резистор в сторону увеличения, установить опорное напряжение + 3,8 В, перенести в отчет совмещенные осциллограммы входного и выходного сигналов;

3. Устанавливая опорное напряжение 0 В и – 3,8 В, повторить п.2;

4. Изменить входное напряжение на 6В. Сделать вывод об изменении порога срабатывания компаратора.

В отчете представить:

- схему для моделирования;
- осциллограммы сигналов для опорного напряжения -3,8В, 0В, +3,8В;
- вывод об изменениях при смене опорного напряжения;
- вывод об изменении порога срабатывания при изменении амплитуды входного напряжения.

Задание 4.3. Исследование схемы компаратора с гистерезисом с помощью компьютерного моделирования

Последовательность исследования:

1. Построить схему на экране монитора компьютера в среде Electronics Workbench (рис.4.12). Допускается использование иной среды моделирования. Генератор на входе 1В, 2 кГц выполняет роль помехи. Схему занести в отчет;

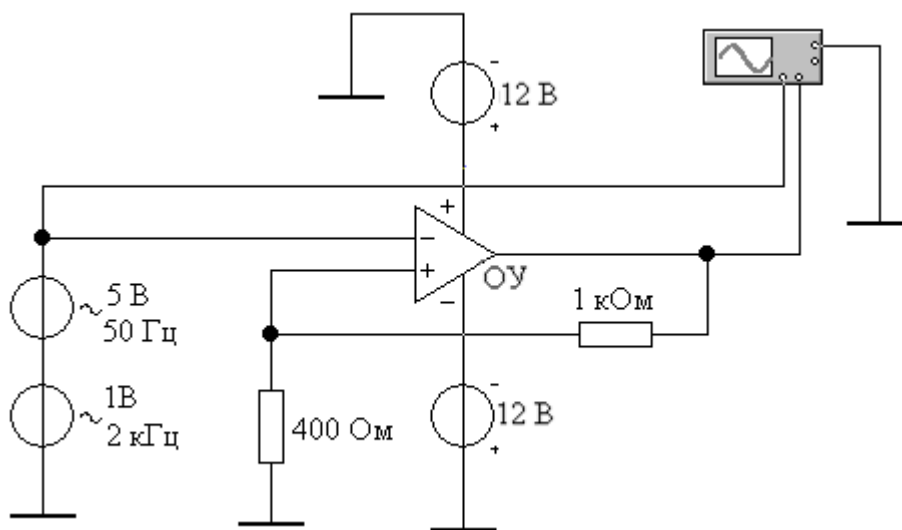


Рис.4.12. Схема моделирования компаратора с гистерезисом

2. Отключить резистор обратной связи 1 кОм от неинвертирующего входа. Вход оставить заземленным через резистор 400 Ом;

3. Включить схему и убедиться по осциллографу, что в выходном сигнале присутствуют многократные переключения ("дребезг"). Перенести в отчет совмещенные осциллограммы входного и выходного сигналов.

4. Подключить резистор обратной связи 1 кОм к неинвертирующему входу. Включить схему и убедиться по осциллографу, что в выходном сигнале отсутствуют многократные переключения ("дребезг"). Перенести в отчет совмещенные осциллограммы входного и выходного сигналов;

5. Сделать вывод о причине пропадания дребезга.

В отчете представить:

- схему для моделирования;
- осциллограммы входного и выходных сигналов для п.3 и 4;
- вывод о причине пропадания дребезга.

Вопросы для самоконтроля

1. Для чего в компараторе необходимо опорное напряжение?
2. Какое соотношение должны иметь амплитуда входного сигнала и опорное напряжение для нормальной работы компаратора напряжения?
3. Что входит в состав ИМС компаратора?
4. Как осуществляется регулирование величины переменного резистора в моделирующей программе?
5. Почему величины напряжения на вольтметре и осциллографе различны? Чему равна эта разница?
6. Что происходит в работе компаратора при смене местами его входов?
7. Почему происходит изменение ширины ступенек выходного сигнала компаратора при изменении порогового значения?
8. Для каких целей используется компаратор в вычислительной технике?
9. На что влияет увеличение сопротивления резистора 1 кОм на рис.4.12?

5. АНАЛИЗ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЛОГИЧЕСКИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Цель

1. Изучить основные способы применения логических интегральных микросхем в комбинационных устройствах для формирования и генерации импульсных сигналов.
2. Научиться моделировать схемы различных типов компараторов с помощью программ Electronic Workbench.

Учебные вопросы

- 5.1. Исследование работы комбинационной схемы;
- 5.2. Исследование генератора импульсов на логических элементах;
- 5.3. Исследование генератора импульсов на ЛЭ с помощью компьютерного моделирования;
- 5.4. Исследование формирователя импульсов на ЛЭ;
- 5.5. Исследование формирователя импульсов на ЛЭ с помощью компьютерного моделирования

Литература для подготовки к занятию

1. Соколов С.В., Титов Е.В. Основы схемотехники. Ростов н/Д.: СКФ МТУСИ, 2010. – 210с.
2. Павлов В. Н, Ногин В. Н., Схемотехника аналоговых электронных устройств. Для высших учебных заведений. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 320с.
3. Опадчий Ю.Ф., Глудкин О. П., Гуров А. И., Аналоговая и цифровая электроника. - М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. - 768с.
4. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях: Практикум на Electronics Workbench / Под ред. Д.И.Панфилова. - М.: Додэка, 1999.
5. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на Electronics Workbench и Vissim по элементам телекоммуникационных систем / В.И. Карлащук. М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 480 с.: ил. – (Серия «Системы проектирования»).
6. Львов В.Л. Методическое пособие по применению программы Electronics Workbench для проведения лабораторных работ по дисциплинам кафедры систем передачи и обработки информации. Ростов-на-Дону: Северо-Кавказский филиал МТУСИ, 2012. – 54 с.

Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. По каждому из заданий должны быть представлены название задания и те конкретные данные, которые указаны в задании.

Вопросы для подготовки к занятию

1. Классификация логических элементов.
2. Основные параметры и характеристики логических элементов.
3. Таблицы истинности основных логических элементов.
4. Области применения логических элементов.

Краткие сведения из теории

Логические элементы являются простейшими схемами цифровых устройств. Из логических схем состоят комбинационные устройства любой сложности, например, арифметико-логические устройства микропроцессоров. Напомним, что комбинационными (цифровыми автоматами без памяти) называются цифровые устройства мгновенного действия, выходные сигналы которых определяются входными сигналами, действующими в рассматриваемый момент времени. Они не имеют памяти и поэтому порядок подачи входных воздействий на них значения не имеет. При одних и тех же входных воздействиях выходы будут всегда одинаковые.

Логические элементы позволяют логические операции производятся над величинами, характеризующими взаимоисключающие понятия: есть и нет, т.е. имеющими только два значения. Для операций с логическими величинами используют двоичный код: одно из значений принимают за единицу, другое - за ноль: $X = 1$ и $\bar{X} = 0$.

В электрических схемах, реализующих логические функции, сигнал, соответствующий логической единице, представляют некоторым высоким напряжением U_1 или уровнем логической единицы. Сигнал, соответствующий логическому нулю, обозначают U_0 . Как правило, $U_1 > U_0$.

Следует помнить, что любые операции, выполняемые над логическими величинами, можно свести к комбинации трех простейших: инверсии (операции отрицания - НЕ), логическому сложению - дизъюнкции (операции ИЛИ) и логическому умножению - конъюнкции (операции И). Более того, можно использовать только схемы И - НЕ или только схемы ИЛИ-НЕ. Каждая из этих групп носят название логического базиса. Это означает, что из каждой группы можно построить логическую функцию произвольной сложности.

Кроме того, логические ИМС применяются для формирования и генерации импульсных сигналов.

Формирователи импульсов (ФИ) преобразуют поступающие на их вход импульсные сигналы, изменяя один или несколько их параметров. ФИ могут быть построены с использованием только логических элементов (ЛЭ), либо на ЛЭ и R, L и C компонентах.

В состав наиболее широко применяемых ИМС серий 155 (555) и 561 входят специально разработанные формирователи (K155АГ1; K561АГ2).

Генераторы (точнее автогенераторы) являются устройствами, создающими периодические электрические сигналы с определенными

параметрами (амплитудой, частотой, скважностью и т.д.) при подведении к ним постоянного питающего напряжения.

В лабораторной работе используется микросхема транзисторно-транзисторной логики типа К155ЛА3 (четыре ЛЭ 2И-НЕ). Расположение выводов К155ЛА3 и принципиальная схема элемента И-НЕ приведены на рис.5.1.

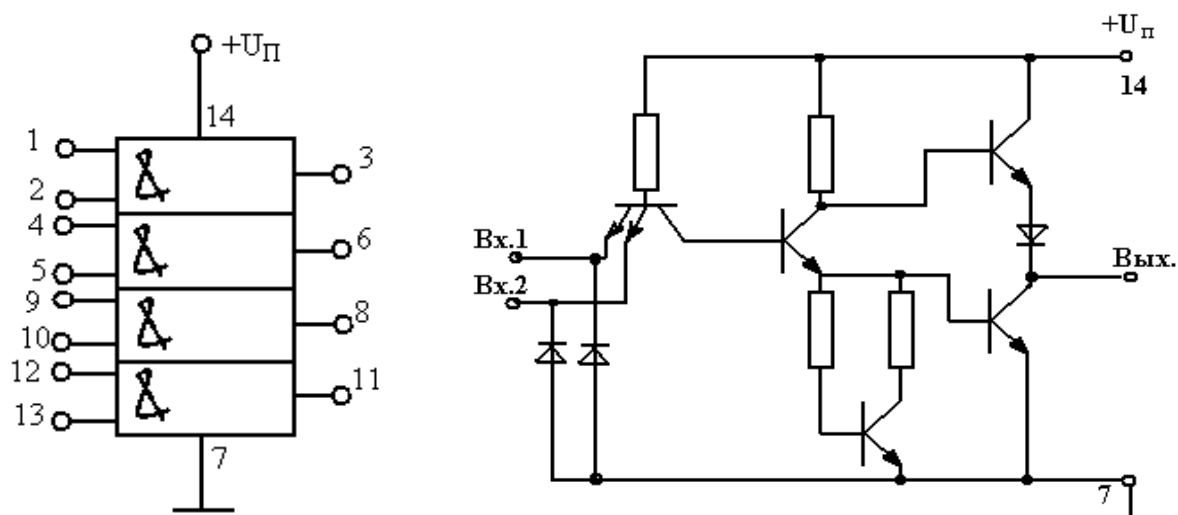


Рис.5.1. Расположение выводов ИМС К155ЛА3

Основные параметры микросхемы: $U_{\Pi} = 5 \text{ В} + 5\%$; допустимые $U_{\text{ВХ}} = 0 - 5 \text{ В}$; уровни логических сигналов $U_{1\text{ВЫХ}} \geq 2,4 \text{ В}$, $U_{0\text{ВЫХ}} \leq 0,4 \text{ В}$; время задержки распространения $t_{\text{зАД}} \leq 15 \text{ нс}$.

С помощью только одних схем И-НЕ можно реализовать любое комбинационное устройство. Например, для реализации элемента НЕ можно использовать схему И-НЕ, в которой соединены все входы (рис 5.2).

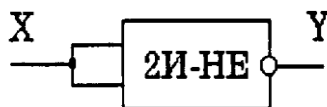


Рис.5.2. Реализация инвертора на ИМС К155ЛА3

Задание 5.1. Исследование работы комбинационной схемы

Синтезировать логическую функцию ИЛИ-НЕ на основе ИМС К155ЛА3 и исследовать ее поведение на всех наборах.

Последовательность исследования:

1. Нарисовать принципиальную схему устройства, состоящую из элементов 2И-НЕ и реализующую функцию 2ИЛИ-НЕ;
2. Записать, соответствующую ей таблицу истинности;
3. С помощью компьютерной программы Electronics Workbench проверить правильность разработанной схемы 2ИЛИ-НЕ, состоящую из логических элементов 2И-НЕ. Для этого необходимо открыть логический конвертор (Logic Converter) в контрольно-измерительных приборах (Instruments), задать в нем таблицу истинности разработанной схемы, преобразовать эту таблицу в логическое выражение и по этому выражению синтезировать схему;
4. Собрать разработанную схему, реализующую операцию 2ИЛИ-НЕ, содержащую только элементы 2И-НЕ (рис. 5.3). Подключить источник питания (номинальное напряжение питания указано выше).

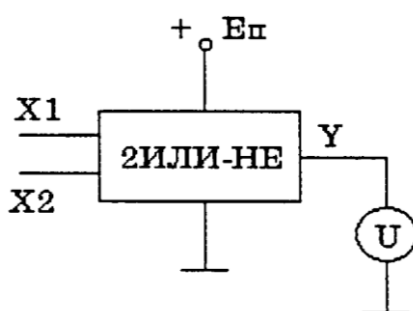


Рис.5.3. Схема для исследования логического элемента

5. Исследовать поведение комбинационной схемы. Для этого, подключая входы 1 и 2 к общей точке (сигнал логического нуля) или к шине питания (сигнал, соответствующий логической единице) и измеряя выходное напряжение, проверьте правильность таблицы состояний собранной схемы.

Сравнить с ранее построенной таблицей.

В отчете представить:

- схему логической функции 2ИЛИ-НЕ из логических схем ИМС К155ЛА3;
- паспортные данные ИМС К155ЛА3;
- таблицу истинности функции 2ИЛИ-НЕ;
- схему для исследования с обозначением выводов ИМС К155ЛА3;
- таблицу истинности, построенную экспериментально.

Задание 5.2. Исследование генератора импульсов на логических элементах

Последовательность исследования:

1. Собрать устройство согласно схеме на рис.5.4. DD1 – микросхема К155ЛА3, $C1 = 0,05 \text{ мкФ}$, $R1 = 1 \text{ кОм}$, $E1 = 5 \text{ В}$;

2. Подключить “Вход 1” осциллографа к выходу генератора, т.е. к точке 1 ИМС. Зарисовать осциллограмму генерируемого сигнала;

3. Подключая “Вход 2” осциллографа к точкам 2, 3, 4 схемы, зарисовать осциллограммы 2, 3, 4 под осциллограммой 1;

4. Измерить с помощью осциллографа период колебаний (T) и рассчитать частоту генерируемых колебаний по формуле:

$$f_r = \frac{1}{T}.$$

5. Увеличить емкость конденсатора $C1 = 1$ мкФ. Повторить измерения по п.п. 2 - 4.

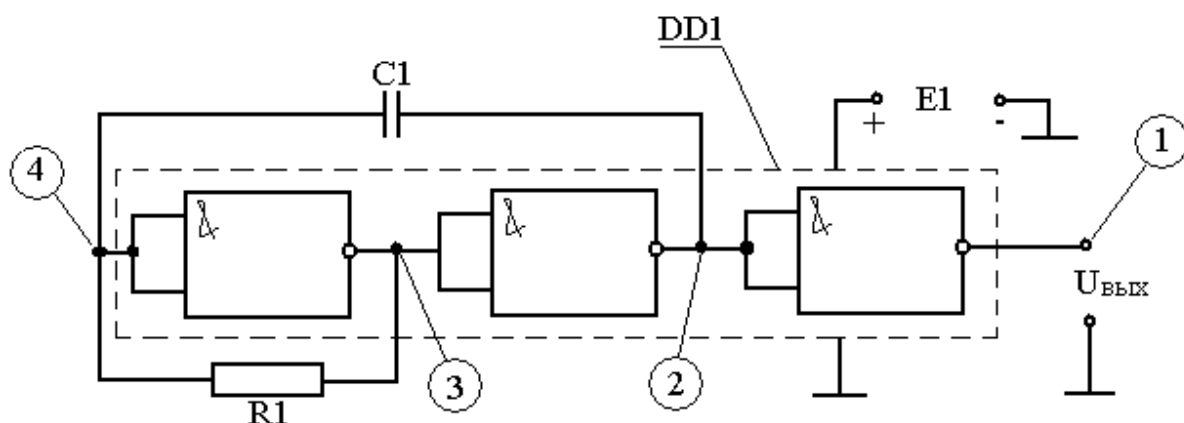


Рис.5.4. Генератор импульсов на логических элементах

В отчете представить:

- схему генератора, на которой указать все номиналы элементов;
- осциллограммы генерируемых сигналов в четырех точках;
- период и частоту генерируемого сигнала, формулы расчета;
- вывод о влиянии емкости $C1$ на параметры генерации.

Задание 5.3. Исследовать генератор импульсов на ЛЭ с помощью компьютерного моделирования

Последовательность исследования:

1. Построить на экране монитора компьютера схему (рис.5.5). В качестве логического элемента использовать микросхему 7400 из набора Digital ICs, выбрать модель HC из библиотеки cmos, HC-2 из библиотеки misc или LS из библиотеки ttl (по указанию преподавателя);

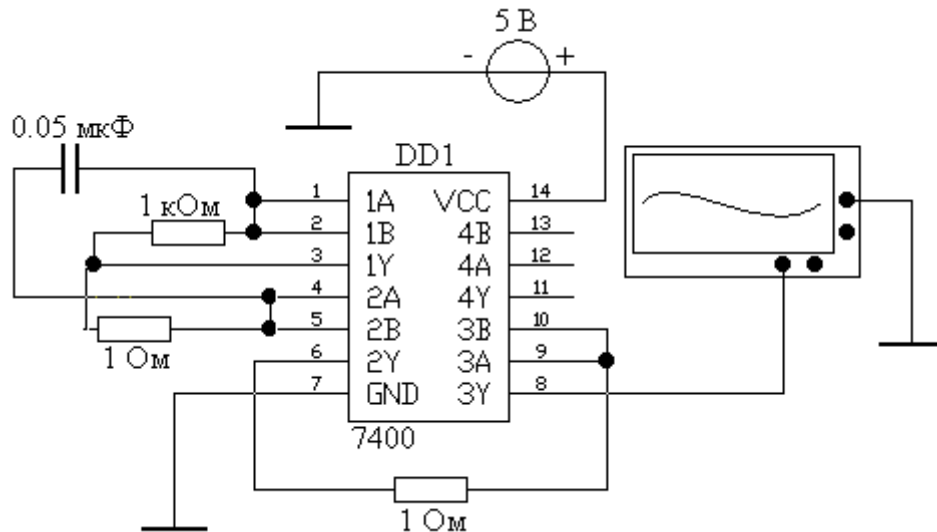


Рис.5.5. Схема генератора импульсов

2. Включить схему, зарисовать выходную осциллограмму;
3. Рассчитать период и частоту колебаний.

В отчете представить:

- схему генератора, на которой указать все номиналы элементов;
- осциллограмму выходного сигнала;
- частоту и период генерации, формулы расчета.

Задание 5.4. Исследование формирователя импульсов на ЛЭ

Последовательность исследования:

1. Собрать схему, показанную на рис. 5.6. Подключить к выводам UBХ вольтметр мультиметра 1 в режиме измерения переменного напряжения. Установить частоту генератора прямоугольных импульсов равной 200 Гц, $UBX = 4\text{ В}$, $E1 = 5\text{ В}$, $R1 = R2 = 1\text{ кГц}$, $C1 = 0,05\text{ мкФ}$;
2. Подключить “Вход 1” осциллографа к точке 1 «UBХ» зарисовать осциллограмму сигнала;
3. Подключая “Вход 2” осциллографа к точкам 2, 3, 4 схемы, зарисовать осциллограммы 2, 3, 4;
4. С помощью осциллографа измерить (по уровню 0,5) длительность сформированного выходного сигнала (осциллограмма 4).

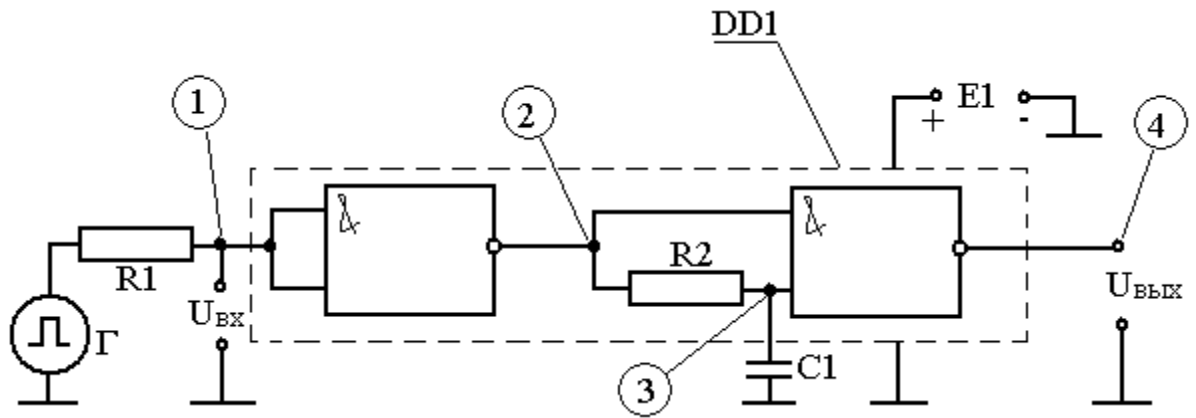


Рис.5.6. Схема формирователя импульсов

В отчете представить:

- схему формирователя, на которой указать все номиналы элементов;
- осциллограммы четырех сигналов;
- длительность выходного сигнала с графической иллюстрацией измерения.

Задание 5.5. Исследование формирователя импульсов на ЛЭ с помощью компьютерного моделирования

Последовательность исследования:

1. Построить на экране монитора компьютера схему (рис.5.7). В качестве логического элемента использовать ту же микросхему 7400 из набора Digital ICs, что и в п. 5.3;
2. Включить схему, зарисовать входную и выходную осциллограммы;

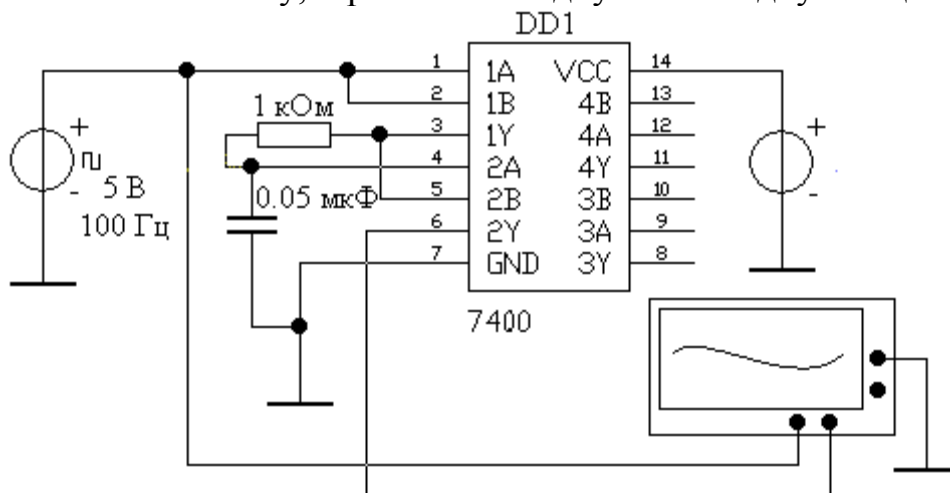


Рис.5.7. Схема формирователя для моделирования

В отчете представить:

- схему формирователя, на которой указать все номиналы элементов;
- осциллограммы входного и выходного сигналов.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение и составьте таблицы состояний для схем НЕ, 2И, 2ИЛИ.
2. Почему схемные реализации операций И-НЕ, ИЛИ-НЕ проще, чем операции И, ИЛИ?
3. Как влияют величины R и C на частоту генератора импульсов на ЛЭ (рис.5.4)?
4. Как влияют величины R и C на длительность импульсов на выходе формирователя (рис.5.6)?