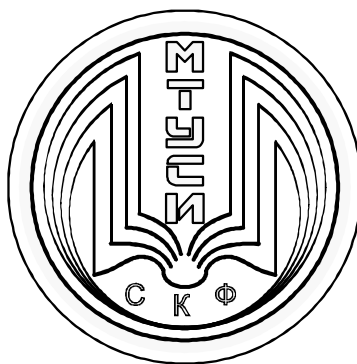


**МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ И МАССОВЫХ
КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФИЛИАЛ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И
ИНФОРМАТИКИ»**



КАФЕДРА ИНФОРМАТИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

В.Л. Львов, С.В. Соколов

ЭЛЕКТРОНИКА

Методическое пособие для проведения лабораторных работ

**Ростов-на-Дону
2021 г.**

Электроника. Методическое пособие для проведения лабораторных работ. Пособие предназначено для проведения занятий с бакалаврами направлений 09.03.01, 11.03.02 очной и заочной форм обучения.

Составитель: Ст. преподаватель кафедры ИВТ Львов В.Л., зав. кафедрой ИВТ Соколов С.В.

Рецензент: Доцент кафедры ОНП к.ф.-м.н. Бородин А.В.

Методическое пособие обсуждено и одобрено
на заседании кафедры ИВТ 14.01.2021 г.

Протокол № 5.

АННОТАЦИЯ

Курс «Электроника» изучается студентами направлений 09.03.01, 11.03.02 очной и заочной форм обучения. Учебный план предусматривает выполнение лабораторного практикума для бакалавров очного и заочного обучения.

Прохождение лабораторного практикума ставит своей задачей использование на практике полученных теоретических знаний. Предлагаемое пособие содержит краткое изложение основных теоретических сведений и порядок выполнения лабораторных работ как на лабораторном стенде «Электронные приборы», так и методом компьютерного моделирования. Выполнение работ базируется на знаниях, полученных при изучении курса «Физические основы электроники» и лекционного материала по курсу «Электроника».

Сборник предназначен для подготовки бакалавров к лабораторным занятиям и является руководством при выполнении лабораторных работ.

Содержание

	стр.
1. Лабораторная работа № 1. Исследование ключевых схем на полевых транзисторах.....	5
2. Лабораторная работа № 2. Исследование аналоговых каскадов на полевых транзисторах.....	12
3. Лабораторная работа № 3. Исследование двухкаскадного интегрального усилителя.....	25
4. Лабораторная работа № 4. Исследование параметров операционных усилителей.....	31
5. Лабораторная работа № 5. Исследование интегральных схем транзисторно - транзисторной логики.....	42
6. Лабораторная работа № 6. Исследование интегральных микросхем на КМДП-транзисторах.....	48
7. Лабораторная работа № 7. Исследование интегральных оптронов.....	55
8. Литература.....	62

Лабораторная работа № 1

Исследование ключевых схем на полевых транзисторах

Цель работы:

- изучить особенности работы полевых транзисторов в ключевых схемах;
- изучить влияние нагрузки на переходную характеристику ключа;
- исследовать использование полевого транзистора в качестве нагрузки ключа.

Подготовка к лабораторной работе

Изучить конспект лекций по данной теме. Обратить внимание, что транзисторный ключ – это устройство, предназначенное для замыкания и размыкания цепи нагрузки под действием управляющего входного сигнала. Они находят широкое применение в импульсной технике, являясь составной частью более сложных дискретных устройств. Самостоятельное применение транзисторные ключи находят в качестве бесконтактных прерывателей.

В соответствии со своим назначением транзисторный ключ должен обладать минимальным током в разомкнутом состоянии, минимальным падением напряжения в замкнутом состоянии, а также максимальной скоростью перехода из одного состояния в другое.

Наиболее распространёнными вариантами полевых приборов, используемых в ключевых схемах, являются МДП-транзисторы. При этом в качестве нагрузки МДП-транзистора может использоваться как активное сопротивление (резистор), так и комплементарный МДП-транзистор (транзистор другой проводимости).

На рисунке 1.1 изображён каскад КМДП, содержащий комплементарную пару транзисторов n МДП T_1 и p МДП T_2 . Транзисторы равноправны; в зависимости от входного напряжения $U_{вх}$ каждый из них может находиться в активном режиме и быть переключателем, тогда комплементарный ему транзистор окажется в режиме отсечки и станет нагрузкой.

Структура КМДП используется как переключатель, реализуя операцию инверсии.

На рисунке 1.2 показана передаточная характеристика КМДП - структуры.

Как видно из рисунка 1.2, при $U_{\text{вх}} < V_{\text{Тн}}$ nМДП-транзистор закрыт, в то время как на затвор комплементарного ему рМДП-транзистора подаётся открывающий его отрицательный потенциал относительно истока. При этом $U_{\text{Вых}} \approx E$.

Когда $U_{\text{вх}} > V_{\text{Тр}}$, рМДП-транзистор закрыт, в то время как на затвор комплементарного ему nМДП-транзистора подаётся открывающий его положительный потенциал относительно истока. При этом $U_{\text{Вых}} = 0$.

Если $V_{\text{Тн}} \approx V_{\text{Тр}}$ КМДП - структура приближается к идеалу и обеспечивает весьма малую потребляемую мощность и максимальную помехоустойчивость в широком допустимом диапазоне вариации напряжения питания (например, в пределах от 3 до 18 В).

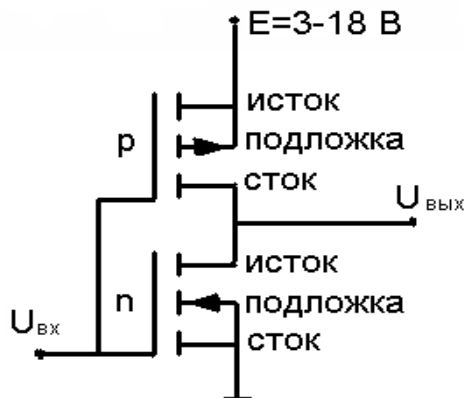


Рисунок 1.1 - КМДП – структура (инвертор)

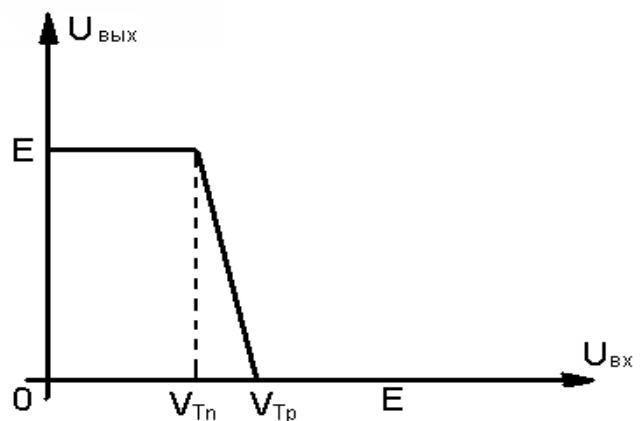


Рисунок 1.2 - Передаточная характеристика КМДП - структуры

Обратите внимание, что для определения уровней логических сигналов используется передаточная характеристика ключа $U_{\text{Вых}} = f(U_{\text{вх}})$ (рисунок 1.3). Уровни логического нуля U^0 и логической единицы U^1 определяются пересечением передаточной характеристики и ее зеркального отражения (пунктир). Разность уровней $U_A = U^1 - U^0$ называется размахом логических сигналов.

В работе используются транзисторы микросхемы К176ЛП1 (рисунок 1.4) которая представляет собой универсальный логический элемент КМДП-структуры (при соответствующей коммутации может быть использован в качестве трех элементов НЕ, элемента НЕ с большим коэффициентом разветвления, элемента ЗИ-НЕ, элемента ЗИЛИ-НЕ и триггерной ячейки).

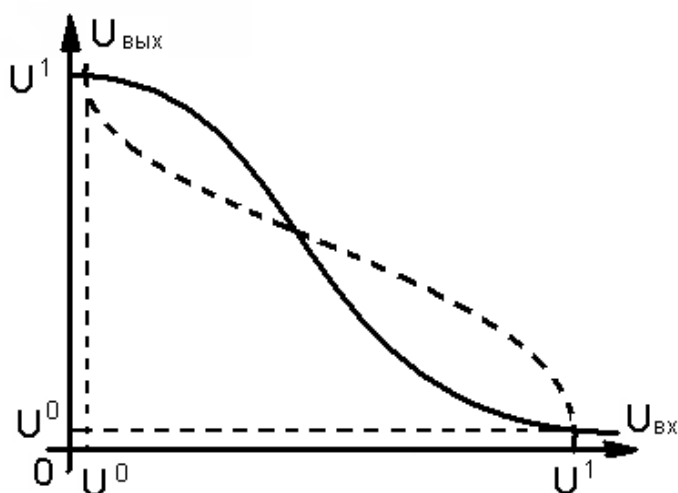


Рисунок 1.3 – Передаточная характеристика ключа

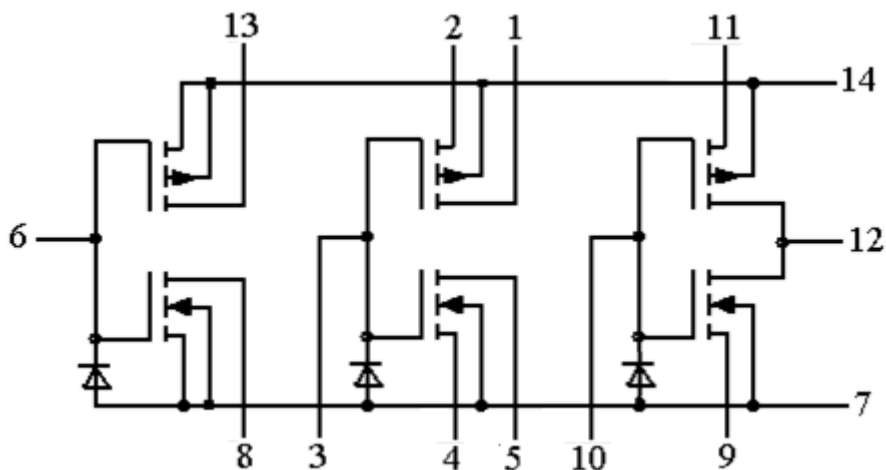


Рисунок 1.4 – Микросхема К176ЛП1

Основные электрические параметры: напряжение питания $U_{п} = 9В + 5\%$, уровни логических сигналов $U^0_{ВЫХ} \leq 0,3В$; $U^1_{ВЫХ} \geq 8,2В$; потребляемый ток - не более 0,3 мА; среднее время задержки распространения ≤ 200 мс.

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

Схемы исследования собираются на лабораторной установке «Электронные приборы».

Лабораторное задание

1. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на передаточную характеристику $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ ключа на ПТ.

Схема исследования ключа на МДП-транзисторе со встроенным каналом n-типа с резисторной нагрузкой приведена на рисунке 1.5. Питание схемы осуществляется от источника E2 и равно 9 В. Входное напряжение $U_{\text{вх}}$ подается от регулируемого источника питания E1. Для измерения входного и выходного напряжений используются вольтметры мультиметров V1 и V2. В качестве VT1 берется один из транзисторов с каналом n-типа микросхемы К176ЛП1.

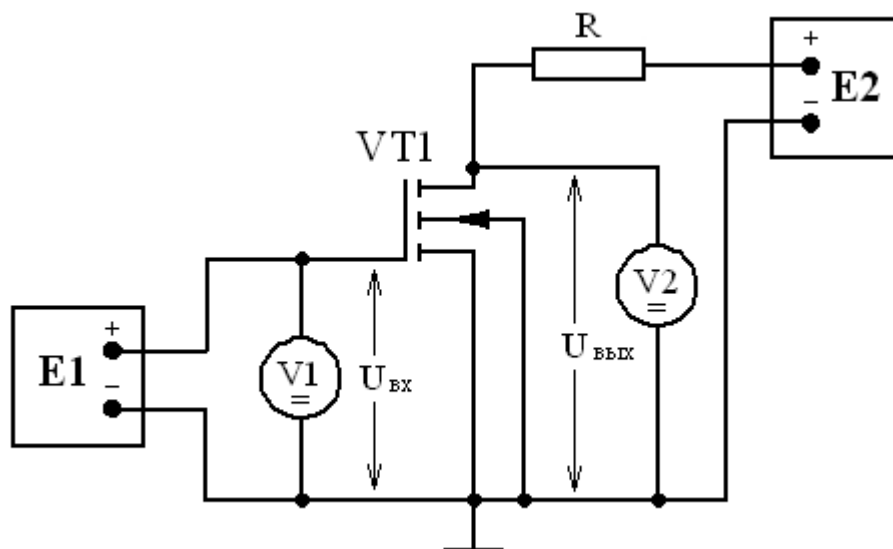


Рисунок 1.5 - Схема исследования ключа с резисторной нагрузкой

Рекомендуется следующий порядок эксперимента:

- подключить в цепь стока транзистора VT1 линейный резистор $R = 1 \text{ кОм}$;
- установить напряжение источника питания $E2 = 9 \text{ В}$;
- изменяя входное напряжение от 0 до 9 В (8 – 10 точек), снять зависимости $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$, результаты занести в таблицу 1.1;

- повторить измерения при других двух значениях сопротивления резистора 5 кОм и 10 кОм (таблица 1.1);

Таблица 1.1

$R = 1 \text{ кОм}$	$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$										
	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$										
$R = 5 \text{ кОм}$	$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$										
	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$										
$R = 10 \text{ кОм}$	$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$										
	$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$										

- по результатам эксперимента построить графики зависимостей $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$. Графики построить в одних осях.

2. Исследовать передаточную характеристику ключа на КМДП - транзисторах.

Схема исследования ключа на КМДП-транзисторах приведена на рисунке 1.6. В качестве транзисторов VT1 и VT2 взять любую пару комплементарных транзисторов микросхемы К176ЛП1.

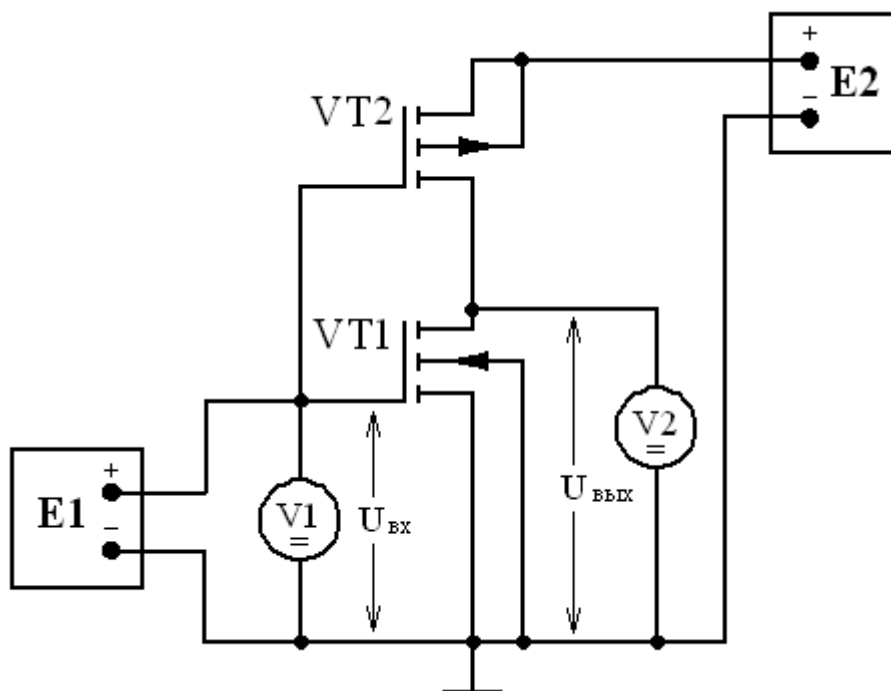


Рисунок 1.6 - Схема исследования ключа на КМДП-транзисторах

Эксперимент провести в следующем порядке:

- установить напряжение источника питания $E2 = 9 \text{ В}$;
- изменяя входное напряжение от 0 до 9 В, снять зависимости $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$, результаты занести в таблицу 1.2;

Таблица 1.2

$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$										
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$										

- по результатам эксперимента построить график зависимости $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$.

3. Исследование ключевых схем на полевых транзисторах с помощью компьютерного моделирования производится в программной среде Multisim.

3.1. Исследовать влияние сопротивления нагрузки на передаточную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ ключа на ПТ.

Построить на экране монитора компьютера схему (рисунок 1.7). В качестве активного элемента использовать идеальный МДП-транзистор n типа, нагрузочное сопротивление $R1$ задается преподавателем в пределах 50 – 200 кОм. Изменяя входное напряжение от 0 до 12 В, снять зависимость $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ для заданного значения сопротивления резистора (см. п. 1), результаты занести в таблицу. По результатам эксперимента построить график зависимости $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$.

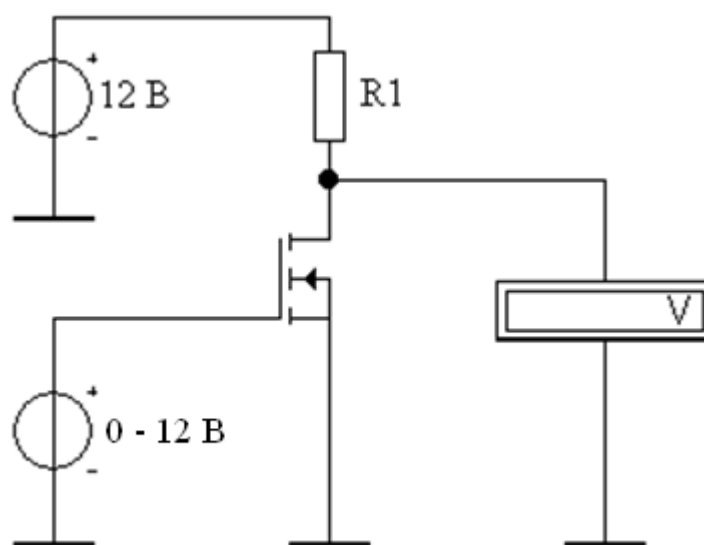


Рисунок 1.7 - Схема исследования ключа с резисторной нагрузкой

3.2. Исследовать передаточную характеристику ключа на КМДП - транзисторах. Построить на экране монитора компьютера схему (рисунок 1.8). В качестве активного транзистора использовать МДП-транзистор n-типа Toshiba серии M2SK или Intrntl 1 серии IRF. Марка транзистора задается преподавателем. В качестве нагрузки используется идеальный МДП-транзистор р - типа. Эксперимент провести аналогично п.3.1.

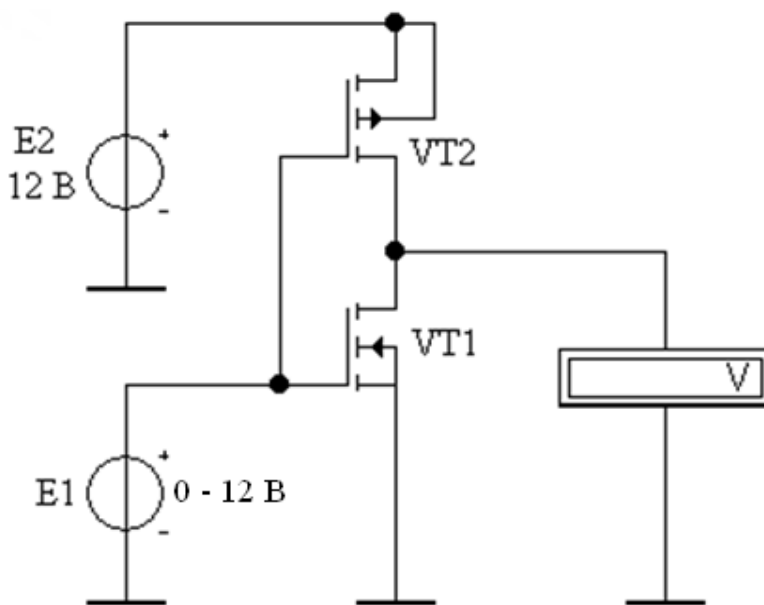


Рисунок 1.8 - Схема исследования ключа на КМДП-транзисторах

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- схему микросхемы K176ЛП1,
- схемы исследований;
- таблицы и графики передаточных характеристик, полученных в п.1 – 3,
- уровни логических сигналов U^0 и U^1 и размах U_A для каждого ключа.

Контрольные вопросы

1. Объясните зависимости параметров ключа с резистивной нагрузкой от величины сопротивления нагрузки.
2. Почему ключ на КМДП - транзисторах практически не потребляет мощность от источника питания в статических состояниях?
3. Сравните характеристики ключа с резистивной нагрузкой и ключа на КМДП-транзисторах.

Лабораторная работа № 2

Исследование аналоговых каскадов на полевых транзисторах

Цель работы:

- исследовать работу основных аналоговых каскадов на полевых транзисторах.

Подготовка к лабораторной работе

Изучить конспект лекций по данной теме. Обратить внимание на работу полевых транзисторов в усилительных каскадах, генераторах тока, управляемых делителях напряжения. Обратите внимание, что интерес к использованию полевых транзисторов связан с большим входным сопротивлением, температурной стабильностью и радиационной стойкостью по сравнению со схемами на биполярных транзисторах.

Настоящая лабораторная работа содержит три части, соответствующие наиболее распространенным применениям полевого транзистора в аналоговых устройствах, каждая из которых включает предварительные расчеты, выполняемые при подготовке и работе, измерения и обработку полученных результатов.

В работе используется полевой транзистор с управляющим n-p-переходом КП103, статические характеристики и параметры которого приведены в таблице 2.1 и на рисунке 2.1. Эти данные, как справочные, так и полученные экспериментально, используются для предварительных расчетов.

Таблица 2.1

Тип	$I_{С \text{ доп, мА}}$	$U_{си \text{ доп, В}}$	$P_{С \text{ доп, мВт}}$	$R_{к, Ом}$	$U_{отс, В}$
КП103И	0,8 – 1,8	12	21	30	0,8 – 3
КП103Л	2,7 – 9	10	66	50	2 – 6
КП103М	5 – 7,5	10	120	60	3 - 5

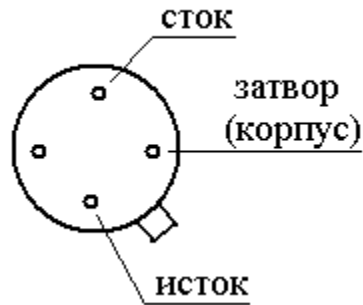


Рисунок 2.1 – Цоколевка полевого транзистора КП 103

Лабораторное задание

I. Исследование усилительного каскада

Наибольшее распространение получили усилители с общим истоком, простейшая схема которого приведена на рисунке 2.2. В этой схеме положение рабочей точки на управляющих характеристиках задается с помощью автоматического смещения. Смещение $U_{0зи} = I_{и}R_C \approx I_C R_C$ создается за счет падения напряжения на сопротивлении R_3 в цепи истока под действием протекающего тока истока $I_{и}(I_C)$ и оказывается приложенным к промежутку затвор-исток через резистор R_2 , сопротивление которого много меньше входного сопротивления полевого транзистора.

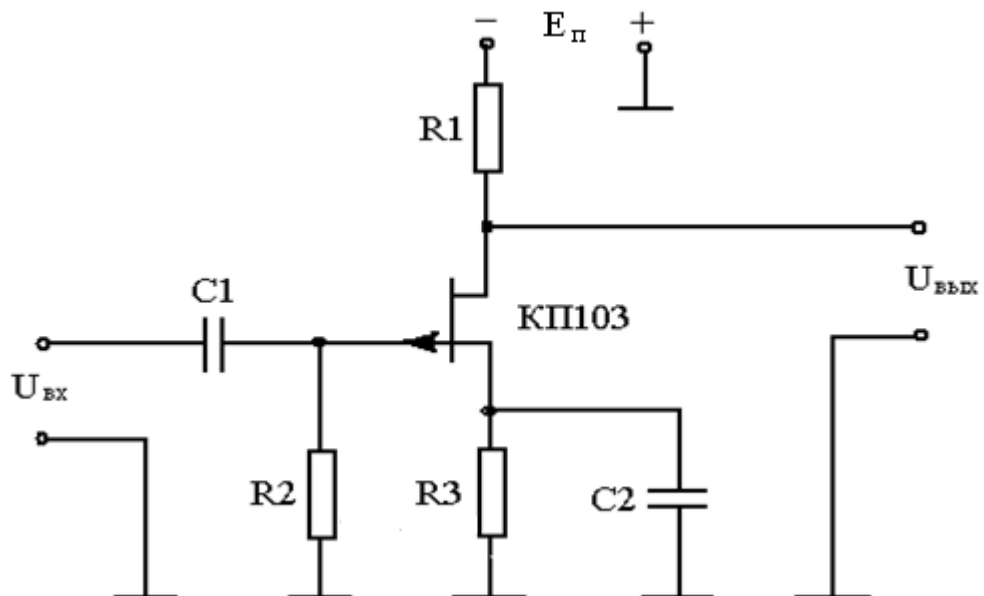


Рисунок 2.2 – Схема усилителя с общим истоком

1.Предварительные расчеты

1.1.Снять характеристику прямой передачи $I_C = f(U_{зи})$ при напряжении $U_{си} = 10$ В. Для этого собрать схему, представленную на рисунке 2.3.

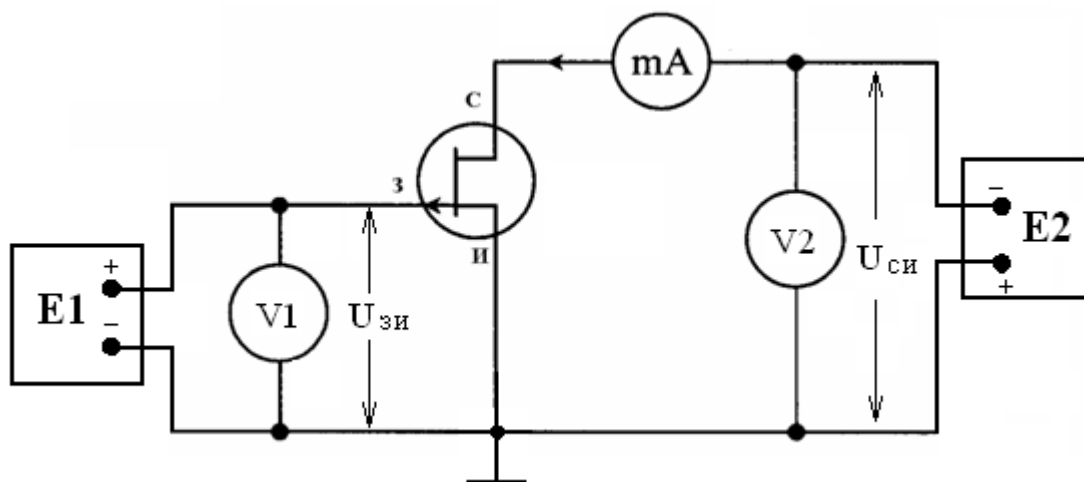


Рисунок 2.3 – Схема для снятия характеристики прямой передачи ПТ

Изменяя напряжение на затворе от 0 до напряжения отсечки (ток стока станет равным 0), заполнить таблицу 2.2

Таблица 2.2

$U_{зи}, \text{В}$							
$I_C, \text{мА}$							

По данным таблицы 2.2 построить график прямой передачи (рисунок 2.4)

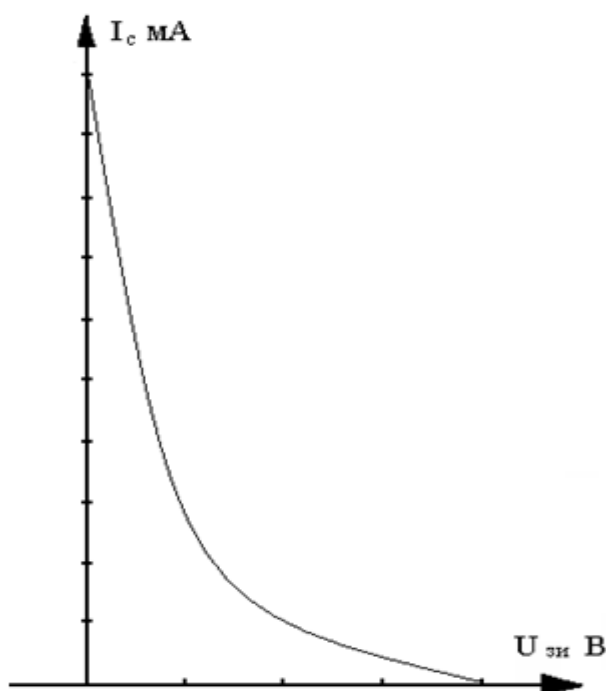


Рисунок 2.4 – Пример графика прямой передачи ПТ

1.2 Для значения $R_3 = 5 \text{ кОм}$ определить величину постоянного напряжения на затворе $U_{0\text{зи}}$ в схеме 2.2. Для этого графически решить систему уравнений

$$\begin{cases} I_c = f(U_{\text{зи}}) \\ I_c = \frac{U_{\text{зи}}}{R_3} \end{cases}$$

Воспользоваться графиком прямо передачи полевого транзистора, приведенным на рисунке 2.4. Графическое решение системы уравнений приведено на рисунке 2.5.

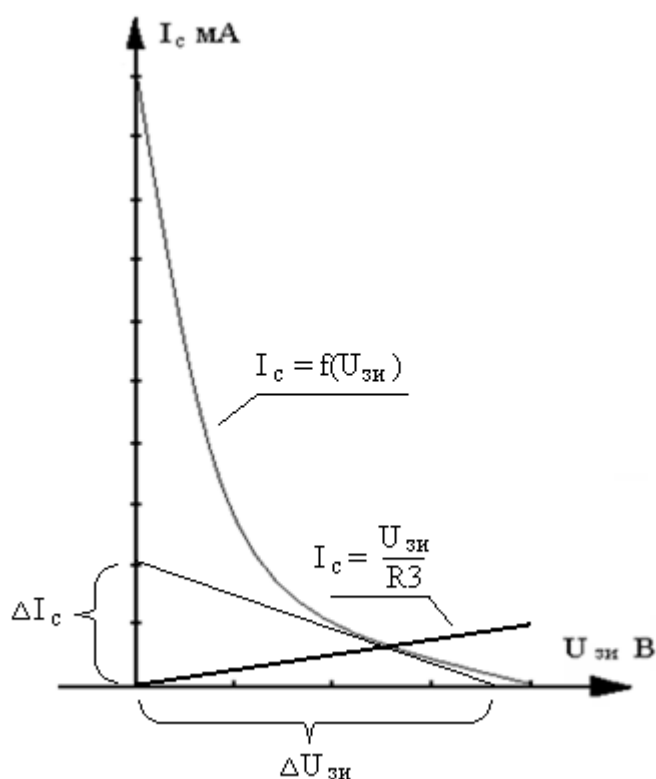


Рисунок 2.5 - Графическое решение системы уравнений

1.3. В найденной рабочей точке определить значение крутизны транзистора S . Крутизна может быть определена графически, для этого через рабочую точку проводится касательная до пересечения с осями координат и вычисляется S по формуле:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{\text{зи}}}$$

Коэффициент усиления усилителя по напряжению вычисляется по формуле:

$$K_U = S \cdot R_H$$

2. Задание на выполнение лабораторного исследования

2.1. Собрать схему усилительного каскада, приведенную на рисунке 2.6. Подключить к входу и выходу схемы входы А и Б осциллографа. От генератора низкочастотных сигналов подать на вход синусоидальное напряжение с частотой $f = 1$ кГц и амплитудой $U_{m\text{ ВХ}} = 80 - 100$ мВ. Измерить $U_{m\text{ ВЫХ}}$ напряжения. Измерение напряжений производить с помощью осциллографа. Убедиться, что выходной сигнал не искажается.

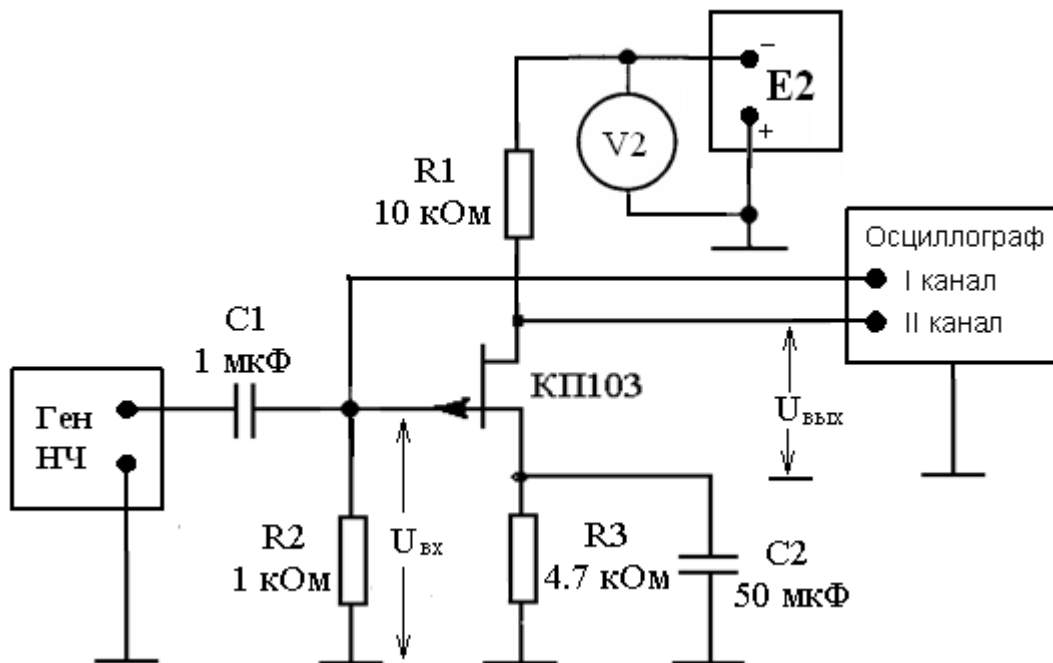


Рисунок 2.6 – Схема для исследования коэффициента усиления усилительного каскада

2.2. Рассчитать коэффициент усиления каскада по напряжению

$$K_U = \frac{U_{m\text{ Вых}}}{U_{m\text{ ВХ}}}$$

и сравнить с результатами предварительных расчетов. Результаты предварительных расчетов и измерений занести в таблицу 2.3.

	$S, \text{mA/V}$	$K_U \text{ РАСЧ}$	$K_U \text{ ИЗМ}$
$R3 = 4,7 \text{ кОм}$			

II. Исследование управляемого делителя напряжения

В работе этой схемы (рисунок 2.7) используется зависимость дифференциального выходного сопротивления транзистора в линейном режиме (начальная область выходных характеристик) от напряжения затвор-исток. Схема представляет собой делитель напряжения, в котором сопротивление транзистора может изменяться под действием управляющего напряжения $U_{упр}$. В качестве выходного сопротивления делителя используется полевой транзистор КП103.

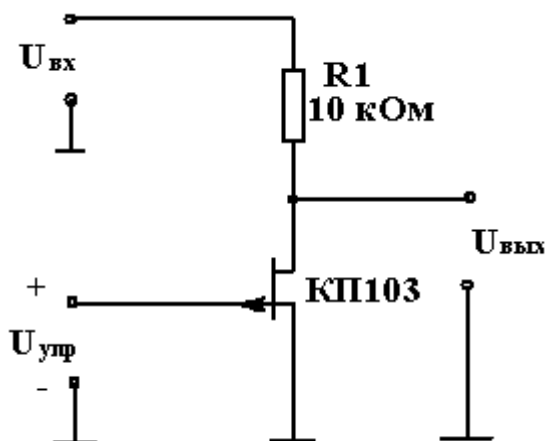


Рисунок 2.7 – Схема делителя напряжения на полевом транзисторе

1. Задание на выполнение лабораторного исследования

1.1. Собрать схему (рисунок 2.8) и подать на вход синусоидальное напряжение с частотой 1 кГц и амплитудой 0,1 В. Измерение входного и выходного напряжений производить с помощью осциллографа. Измерение управляющего напряжения производить с помощью вольтметра.

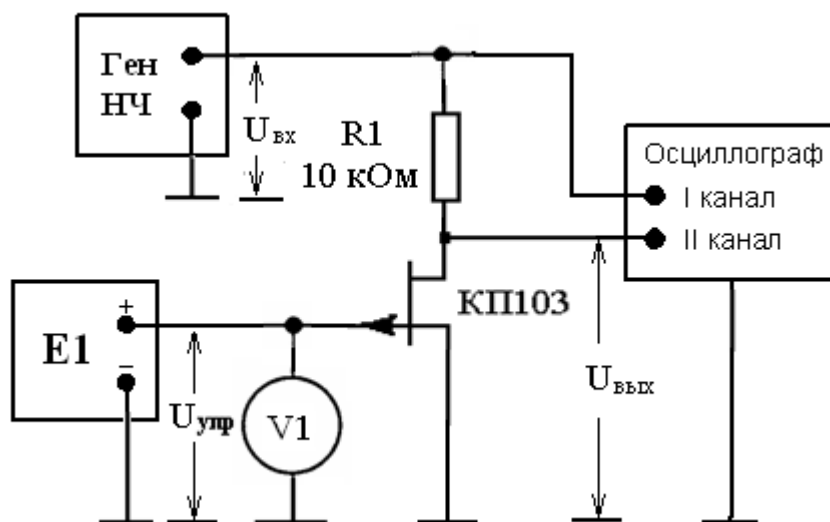


Рисунок 2.8 Схема для измерения зависимости коэффициента передачи делителя от управляющего напряжения

1.2. Изменяя значение управляющего напряжения $U_{упр}$, подаваемого от источника $E1$, от нуля до запираения транзистора, измерить выходное напряжение (6 – 8 точек). Результаты занести в таблицу 2.4

Таблица 2.4

$U_{упр}$, В							
$U_{вых}$, мВ							
K_U							

Вычислить коэффициент передачи делителя в каждой точке по формуле

$$K_U = \frac{U_{вых}}{U_{вх}},$$

результаты занести в таблицу 2.4.

По данным таблицы 2.4 построить график зависимости коэффициента передачи делителя от управляющего напряжения.

$$K_U = f(U_{упр}).$$

III. Исследование источника тока на полевом транзисторе

При проектировании электронных устройств нередко возникает необходимость в источнике тока, близкого по своим параметрам к идеальному.

Идеальный источник тока обладает бесконечно большим ЭДС и бесконечно большим внутренним сопротивлением, что позволяет получить требуемый ток в цепи независимый от сопротивления нагрузки. Реальные источники тока поддерживают ток на требуемом уровне в ограниченном диапазоне напряжения и на ограниченном сопротивлении нагрузки. Для создания таких источников используются как биполярные, так и полевые транзисторы.

Схема источника тока на полевом транзисторе представлена на рисунке 2.9. В этой схеме используется слабая зависимость тока стока от напряжения сток-исток в режиме насыщения. На рисунке 2.10 показан участок А-В выходной характеристики полевого транзистора в режиме насыщения, на котором изменение тока мало при изменении напряжения от U_{\min} до U_{\max} .

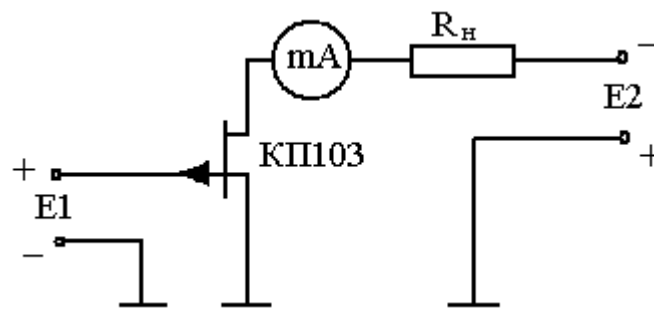


Рисунок 2.9 - Схема источника тока на полевом транзисторе

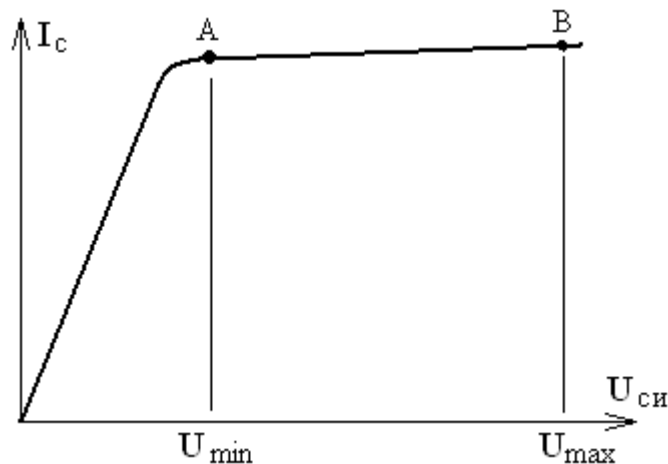


Рисунок 2.10 - Участок А-В выходной характеристики полевого транзистора в режиме насыщения

1. Задание на выполнение лабораторного исследования.

1.1 Собрать схему источника тока (рисунок 2.10) при $R_H = 0$ (сопротивление R_H замкнуть). Установить напряжение $E_2 = 9\text{В}$.

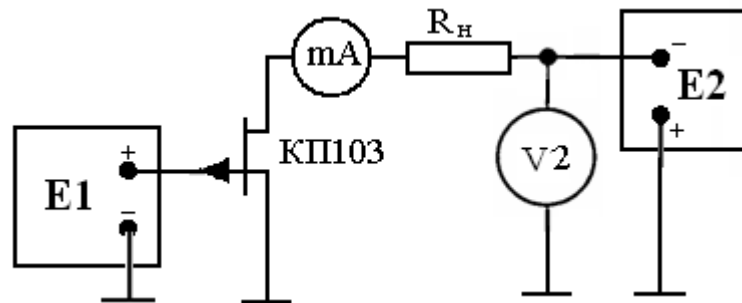


Рисунок 2.11 – Схема для исследования источника тока
на полевом транзисторе

1.2 Регулируя напряжение E_1 , установить ток стока (в цепи нагрузки) $I_H = 1\text{mA}$.

1.3 Не изменяя напряжение источника E_1 , подключить $R_H = 4,7\text{ кОм}$ и зафиксировать новое значение тока I_H' .

1.4. Рассчитать изменение тока I_H , соответствующее изменению нагрузки от $R_H = 0$ до $R_H = 4,7\text{ кОм}$.

2. Обработка результатов эксперимента.

2.1. Рассчитать параметры $R_{ЭКВ}$ и $E_{ЭКВ}$ резистивного генератора тока, эквивалентного транзисторному. Для этого решить систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{E_{ЭКВ}}{R_{ЭКВ}} = I_H \\ \frac{E_{ЭКВ}}{R_{ЭКВ} + R_H} = I_H' \end{cases}$$

IV. Исследование схем на полевом транзисторе с помощью компьютерного моделирования

Исследование схем на полевом транзисторе с помощью компьютерного моделирования производится в программной среде Multisim.

1. Исследование усилительного каскада на полевом транзисторе с помощью компьютерного моделирования.

1.1. Построить на экране монитора компьютера схему (рисунок 2.12). В качестве активного элемента использовать полевой р-канальный транзистор motorola J1R, J2N, national1, national2 (задается преподавателем). Вольтметр в схеме установить в режим измерения переменного напряжения (AC). Задать параметры входного сигнала $U_{ВХ} = 10$ мВ, $f = 1$ кГц, подбирая $R3$ в пределах 1 – 20 кОм, найти такое $R3$, при котором выходное напряжение максимально.

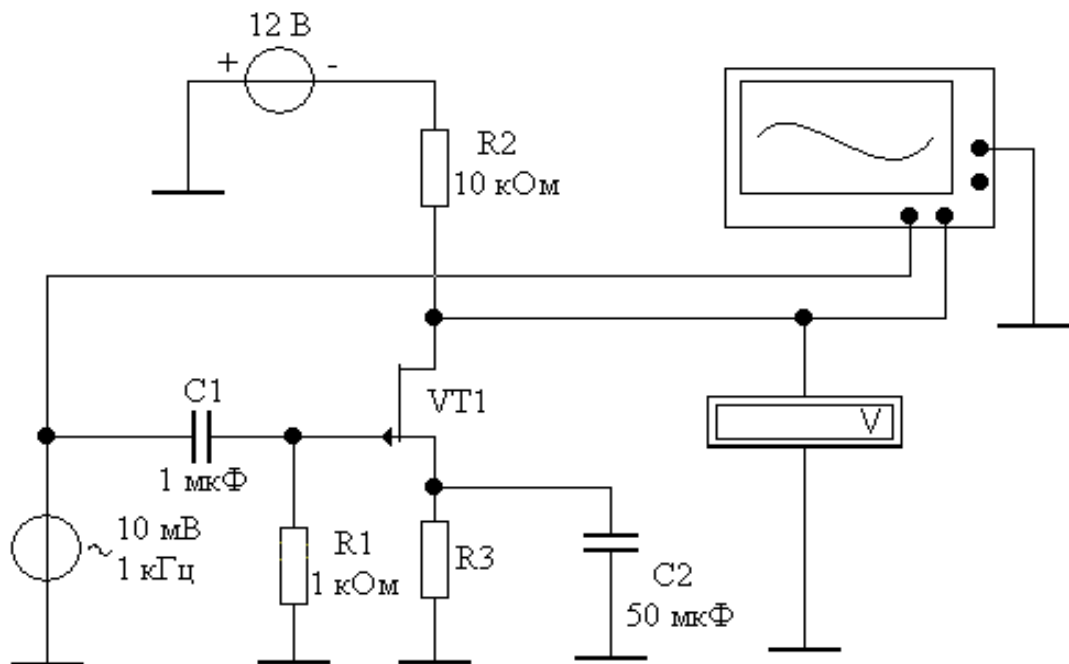


Рисунок 2.12 – Схема исследования усилительного каскада на полевом транзисторе

Вычислить коэффициент усиления. Убедиться по осциллографу в отсутствии искажения выходного сигнала. Увеличивая напряжение генератора, найти такое максимальное $U_{ВХ}$ при котором еще искажения выходного сигнала отсутствуют. Вычислить коэффициент усиления. Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов. Еще увеличить входное напряжение, зарисовать осциллограмму искаженного выходного сигнала.

1.2. Исследовать частотную зависимость коэффициента усиления. Установить $U_{ВХ} = 10$ мВ. Увеличивать частоту входного сигнала от 1 кГц до тех

пор, пока $U_{\text{ВЫХ}} \approx 10$ мВ (единичное усиление). Результаты занести в таблицу 2.5. Построить график зависимости коэффициента усиления от частоты.

Таблица 2.5

f, кГц									
$U_{\text{ВЫХ}}$, мВ									
K_y									

На графике отметить верхнюю граничную частоту работы усилителя, на которой коэффициент усиления уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

2. Исследовать управляемый делитель напряжения на полевом транзисторе с помощью компьютерного моделирования.

2.1. Построить на экране монитора компьютера схему (рисунок 2.13). В качестве активного элемента использовать полевой р-канальный транзистор motorola J1R, J2N, national1, national2 (задается преподавателем). Вольтметр в схеме установить в режим измерения переменного напряжения (АС).

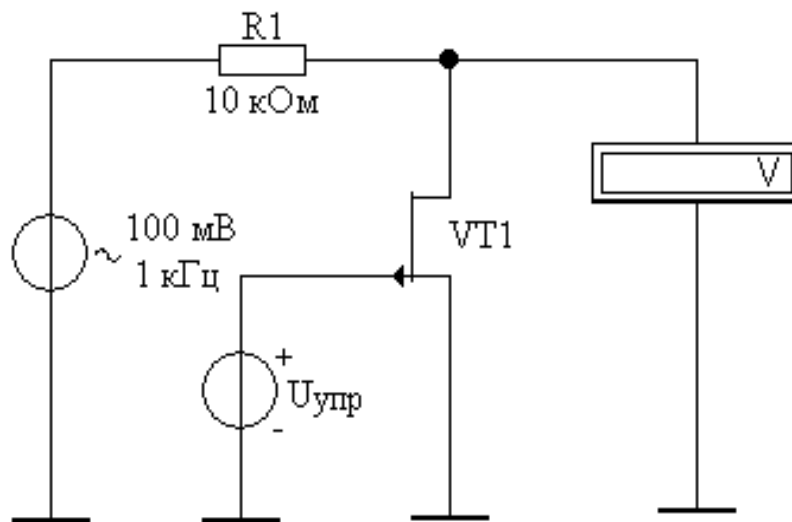


Рисунок 2.13 – Схема для исследования управляемого делителя напряжения

2.2. Задать параметры входного сигнала $U_{\text{ВХ}} = 100$ мВ, $f = 1$ кГц, изменяя напряжение на затворе от 0 В до запираания транзистора, измерить выходное напряжение и вычислить коэффициент передачи по формуле:

$$K_U(U_{упр}) = \frac{U_{m\text{ BbLX}}}{U_{m\text{ BX}}}$$

Результаты измерений занести в таблицу (см. табл. 2.4). По данным таблицы построить график зависимости коэффициента передачи делителя от управляющего напряжения.

$$K_U = f(U_{упр}).$$

3. Исследовать источник тока на полевом транзисторе с помощью компьютерного моделирования.

3.1. Построить на экране мониторе схему источника тока (рисунок 2.14).

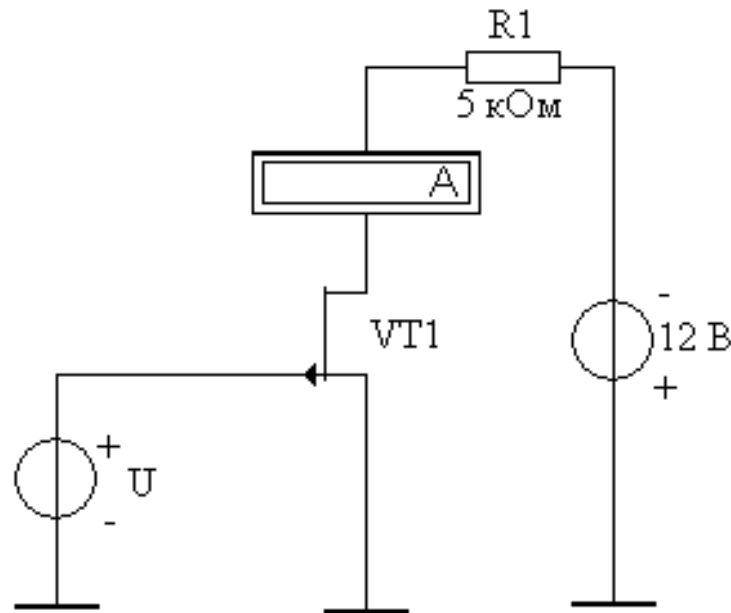


Рисунок 2.14 – Схема для исследования источника тока
на полевом транзисторе

3.2. Задать $R_1 = R_H = 0$, т.е. удалить резистор из схемы и подбирая напряжение на затворе транзистора добиться в цепи стока (в цепи нагрузки) $I_H = 1\text{mA}$.

3.3. Подключить резистор нагрузки $R_H = 5\text{ kOhm}$ и, не изменяя напряжения на затворе, зафиксировать новое значение I_H' .

3.4. Рассчитать изменение тока I_H , соответствующее изменению нагрузки от $R_H = 0$ до $R_H = 5\text{ kOhm}$.

4. Обработка результатов эксперимента.

Рассчитать параметры $R_{ЭКВ}$ и $E_{ЭКВ}$ резистивного источника тока, эквивалентного транзисторному. Для этого решить систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{E_{ЭКВ}}{R_{ЭКВ}} = I_H = 1mA \\ \frac{E_{ЭКВ}}{R_{ЭКВ} + R_H} = I_H' \end{cases}$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- справочные данные исследуемого транзистора;
- схемы исследований;
- результаты измерений и расчетов;
- графики снятых зависимостей.

Контрольные вопросы

1. Как и почему коэффициент усиления каскада с общим истоком зависит от величины сопротивления автосмещения?

1. Как и почему изменится усиление каскада, если убрать конденсатор C_2 , шунтирующий резистор автосмещения?

2. Зависит ли работа делителя напряжения на полевом транзисторе от частоты? Если да, то почему?

3. Каковы преимущества транзисторного генератора тока по сравнению с простейшим резистивным?

Лабораторная работа № 3

Исследование двухкаскадного интегрального усилителя

Цель работы:

- исследовать влияние отрицательной обратной связи на параметры универсального двухкаскадного усилителя.

Подготовка к лабораторной работе

Изучить конспект лекций по данной теме. При этом особое внимание обратить на зависимость параметров усилителя (коэффициентов усиления, входного и выходного сопротивлений) от способов организации и глубины обратной связи.

В данной работе измеряются параметры аналоговой ИМС К1УС181Б, представляющей собой универсальный двухкаскадный усилитель с непосредственной (гальванической) связью между каскадами. Схема усилителя и нумерация выводов изображена на рисунке 3.1.

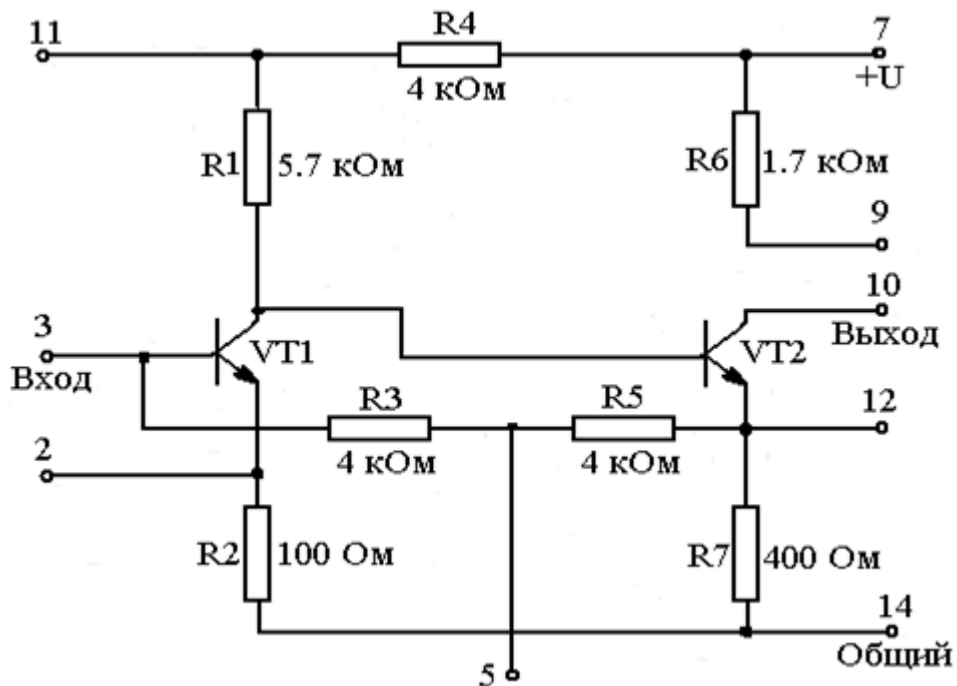


Рисунок 3.1 – Схема универсального двухкаскадного усилителя

Резисторы в цепях коллекторов являются нагрузками первого и второго каскадов, резисторы в цепях эмиттеров предназначены для обеспечения режимов транзисторов по постоянному току и создания обратной связи в каждом каскаде. Для стабилизации режима по постоянному току (и его

заданию) усилитель охвачен отрицательной параллельной обратной связью по току ($R_{OC} = R_3 + R_5$).

Дополнительные выводы от внутренних точек ИМС позволяют разработчику аппаратуры использовать различные схемы включения. Например, существование разрыва между точками 9 и 10 позволяет включать в коллекторную цепь второго транзистора различные нагрузки (резисторы, трансформаторы, колебательные контуры). Подключение конденсаторов большой емкости к выводам 12, 5, 2 позволяет устранять обратную связь (полностью или частично) по переменному току.

Основные параметры микросхемы K1YC181Б:

напряжение питания $U_{\Pi} = 6,3 + 10\% \text{ В}$, коэффициент усиления по напряжению $K_{\Pi} = 25...40$, входное сопротивление $R_{BX} = 1,5...2 \text{ кОм}$, максимальная частота усиливаемого сигнала $f_{\max} = 5 \text{ МГц}$, максимальное напряжение входного сигнала $U_{BX \max} = 50 \text{ мВ}$.

В работе исследуются параметры микросхемы в двух схемах включения. В первой обратная связь по переменному току в рабочем диапазоне частот отсутствует, так как цепь эмиттера второго транзистора шунтируется конденсатором большой емкости. Отметим, что обратная связь по постоянному току сохраняется и обеспечивает высокую стабильность. Эта схема является типовой (рекомендуется для использования).

Во второй схеме усилитель работает с параллельной отрицательной обратной связью по току, уменьшающей коэффициент усиления, но одновременно снижающей линейные и нелинейные искажения. Кроме того, поскольку сигнал обратной связи пропорционален выходному току, выходное сопротивление $R_{ВЫХОС}$ увеличивается по сравнению с выходным сопротивлением каскада без обратной связи $R_{ВЫХ}$, а входное сопротивление $R_{ВХОС}$ уменьшается по сравнению с $R_{ВХ}$, так как сигнал обратной связи поступает на вход параллельно входному сигналу. Данный способ создания обратной связи эффективен при большом сопротивлении источника сигнала $R_{Г} \gg R_{ВХ}$ и малом сопротивлении нагрузки $R_{Н} \ll R_{ВЫХ}$.

Лабораторная работа выполняется на лабораторной установке «Электронные приборы».

Лабораторное задание

1. Собрать схему для измерения параметров усилителя (рисунок 3.2).

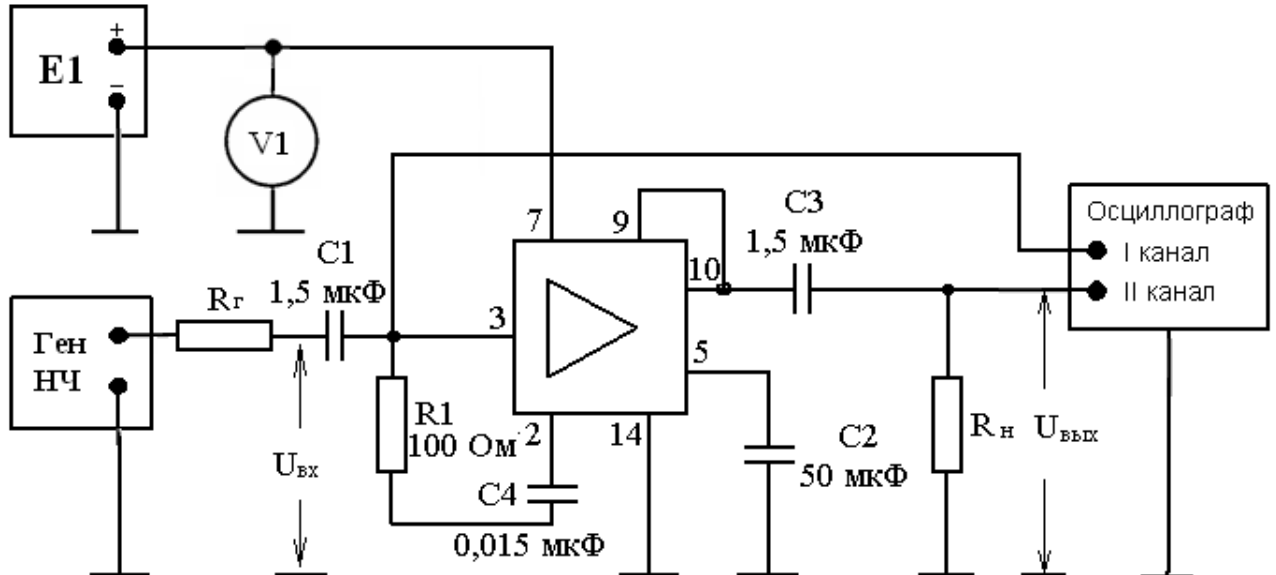


Рисунок 3.2 – Схема для измерения параметров усилителя

Подключить к входу схемы через резистор $R_{\Gamma} = 10 \text{ кОм}$ генератор сигналов ГЗ-112, а к выходу сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$. Для контроля формы сигналов к входу и выходу подключить осциллограф.

Установить частоту сигнала генератора НЧ 1 кГц. Регулируя амплитуду подаваемого на вход схемы синусоидального напряжения, получить неискаженный сигнал на выходе ИМС.

Примечание: если усилитель возбуждается, подключить между входами 2 и 3 соединенные последовательно резистор 100 Ом и конденсатор 0,015мкФ.

2. Измерить параметры усилителя без обратной связи (конденсатор C2 подключен к выводу 5).

С помощью осциллографа измерить амплитуды напряжений на входе усилителя $U_{\text{мвх}}$ и на выходе $U_{\text{мвых}}$ (на сопротивлении нагрузки). По результатам измерений рассчитать коэффициент усиления по напряжению

$$K_U = \frac{U_{\text{мвых}}}{U_{\text{мвх}}}.$$

3. Измерить параметры усилителя с обратной связью.

Отключить от схемы конденсатор C2, шунтирующий цепь обратной связи. Увеличить амплитуду напряжения генератора $U_{мГ}$ примерно в 5 раз для компенсации уменьшения коэффициента усиления, на выходе должен быть неискаженный сигнал.

Повторить измерения и расчеты по п.2.

4. Исследовать работу усилителя с частотно-зависимой обратной связью.

Подключить конденсатор C2=50 мкФ к выводу 5. Установить частоту сигнала 1 кГц. Регулируя амплитуду подаваемого на вход схемы синусоидального напряжения, получить неискаженный сигнал на выходе ИМС.

Изменяя частоту источника сигнала в пределах 1 кГц - 700 кГц, измерить зависимость коэффициента усиления $K_U = \frac{U_{mBbIX}}{U_{mBX}}$ усилителя без обратной связи от частоты. Результаты занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

f, кГц	1	5	10	50	100	300	500	700
$U_{вых}$, мВ								
K_y								

Построить график частотной зависимости коэффициента усиления по напряжению $K_y(f)$.

5. Исследовать двухкаскадный усилитель с помощью компьютерного моделирования в программной среде Multisim.

5.1. Построить на экране монитора компьютера схему (рисунок 3.3). В качестве активных элементов использовать транзисторы n-p-n типа серии 2п, motorolla1, national1, toshiba (задается преподавателем), вольтметры в схеме устанавливаются в режим измерения переменного тока (АС).

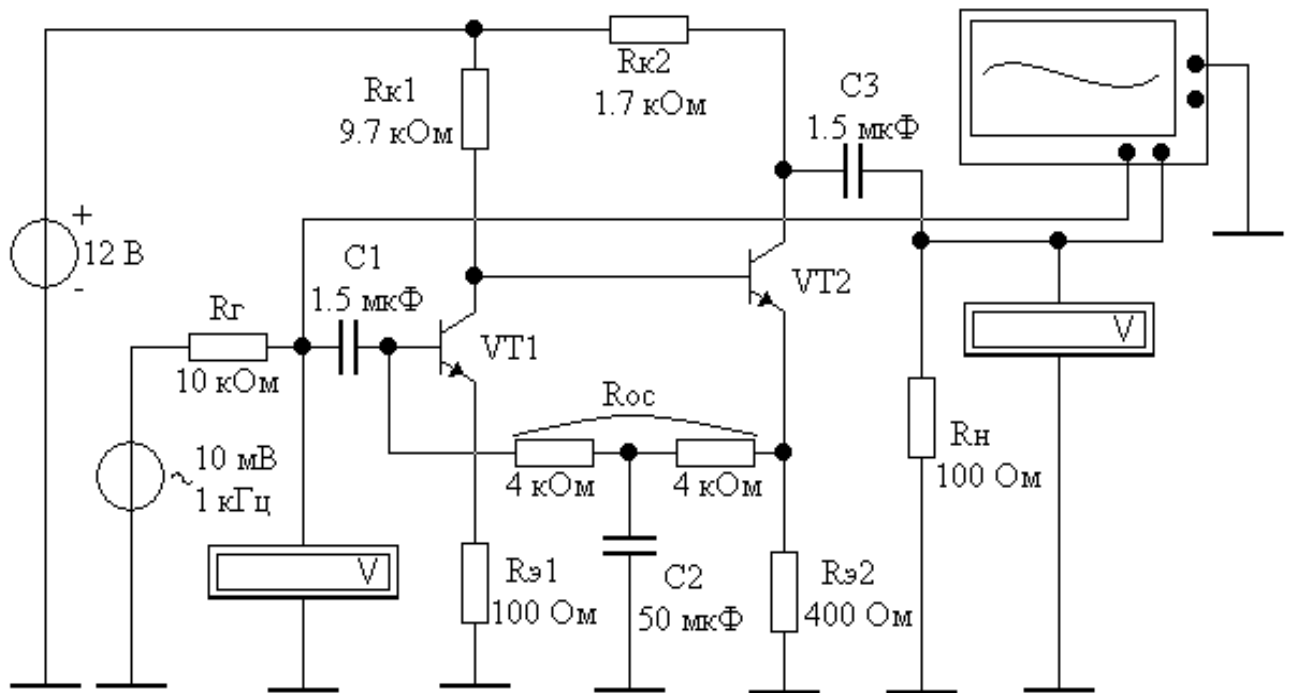


Рисунок 3.3 – Схема для исследования универсального двухкаскадного усилителя

5.2. Задать параметры входного сигнала $U_{\Gamma} = 10 \text{ мВ}$, $f_{\Gamma} = 1 \text{ кГц}$. Убедиться по осциллографу в том, что выходной сигнал не искажен. Измерить входное и выходное напряжение и вычислить коэффициент усиления по напряжению.

5.3. Увеличивать напряжение входного сигнала до появления искажений. Измерить входное и выходное напряжение и вычислить коэффициент усиления по напряжению.

5.4. Измерить коэффициент усиления по напряжению в схеме с отрицательной обратной связью, для этого из схемы необходимо убрать конденсатор 50 мкФ. Установить исходный входной сигнал $U_{\Gamma} = 100 \text{ мВ}$, $f_{\Gamma} = 1 \text{ кГц}$. Убедиться по осциллографу в том, что выходной сигнал не искажен. Измерить входное и выходное напряжение и вычислить коэффициент усиления по напряжению.

5.5. Восстановить в схеме конденсатор 50 мкФ, установить $U_{\Gamma} = 10 \text{ мВ}$. Изменяя частоту входного сигнала от 1 кГц до 10 мГц (8 – 10 значений), измерить выходное напряжение, результаты измерений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

f, кГц								
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$								
K_u								

5.6. Рассчитать коэффициент усиления для каждой частоты по формуле

$K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$. Построить график зависимости коэффициента усиления от частоты.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- принципиальную схему микросхемы;
- схемы включения усилителя и схемы измерений;
- результаты измерений и расчетов, сведенные в таблицы;
- графики частотных зависимостей.

Контрольные вопросы

1. Объясните, как и с какой целью могут быть использованы дополнительные выводы микросхемы 5, 2, 11, разрыв между выводами 9 и 10.
2. Какое входное сопротивление должны иметь усилители с токовым и потенциальным выходами?
3. Какое выходное сопротивление должны иметь усилители с токовым и потенциальным выходами?
4. Почему отрицательная обратная связь уменьшает линейные и нелинейные искажения усилителя?

Цель работы:

- ## Подготовка к лабораторной работе

Изучить конспект лекций по данному разделу. При изучении следует иметь в виду, что 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 (рисунок 4.1), отвечающая следующим основным принципам схемотехники ОУ:

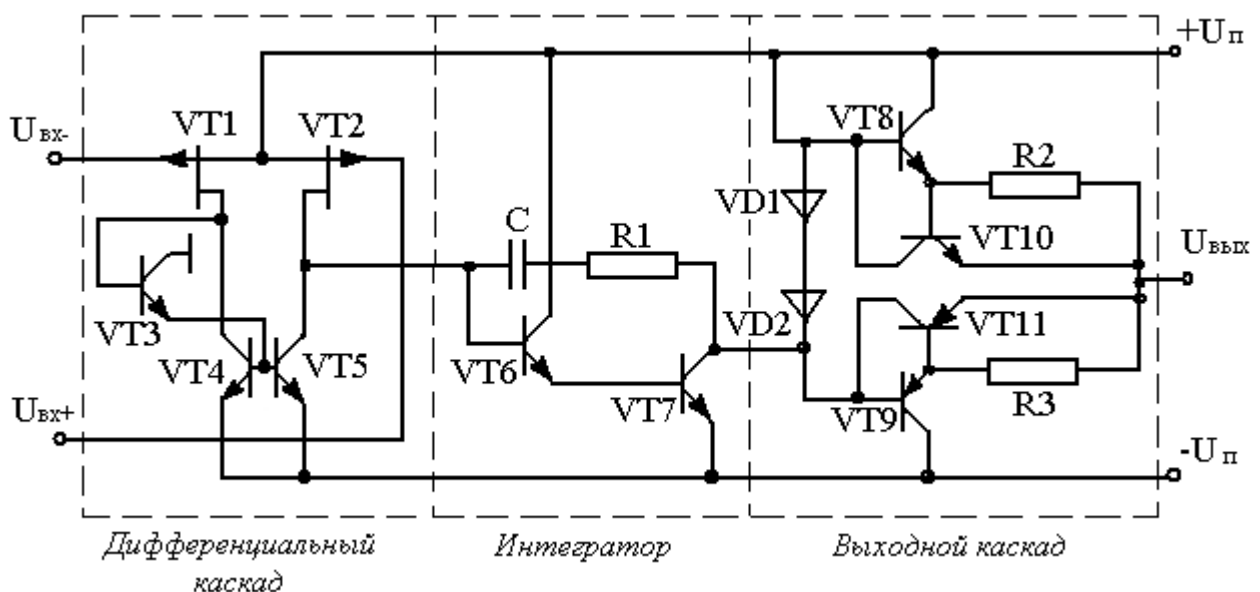


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема операционного усилителя

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

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 усилитель назван потому, что предназначен для выполнения математических операций над входными сигналами при использовании его в электрической схеме с цепью внешней обратной связи. При соответствующем выборе элементов этой цепи ОУ может использоваться для сложения, вычитания, перемножения, усреднения, интегрирования, дифференцирования, логарифмирования и т.п. При этом точность выполнения указанных операций тем выше, чем больше коэффициент усиления и входное сопротивление СУ и чем меньше выходное сопротивление.

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_{CM} . 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_{CM} составляет доли милливольт - десятки милливольт;

- входные токи – I_{BX} . 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_{BX} - доли наноампер - десятки микроампер;

- разность входных токов - ΔI_{BX} может достигать 10...20% от I_{BX} . Она характеризует степень неидентичности транзисторов входного каскада ОУ;

- скорость нарастания выходного напряжения $U_{Н\text{ вых}}$ - 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_1 - значение частоты входного сигнала, при котором значение коэффициента усиления ОУ по напряжению падает до единицы. Данный параметр определяет максимально реализуемую полосу усиления ОУ.

Условные графические обозначения ОУ и назначения выводов приведены на рисунке 4.2 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 (нулевой потенциал) схемы.

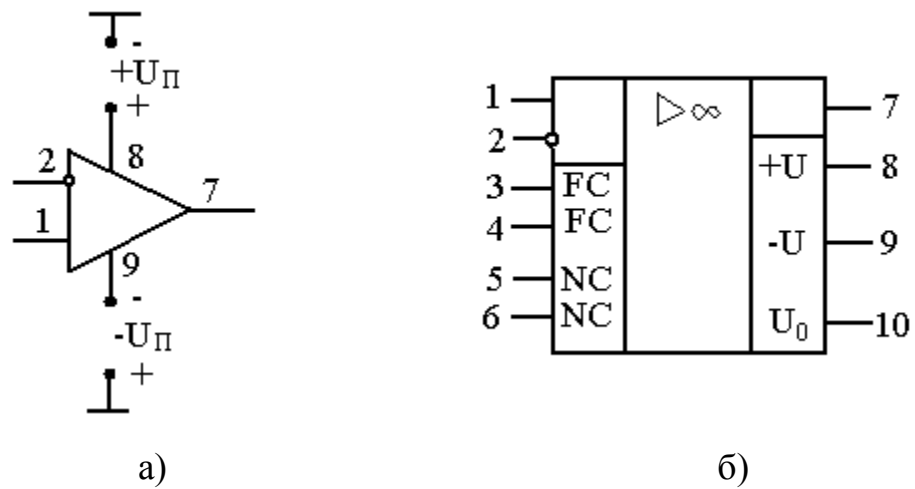


Рисунок 4.2 – Условное графическое изображение ОУ

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 возбуждаются.

Работа выполняется на лабораторной установке «Электронные приборы». Расположение выводов, схемы коррекции исследуемого ОУ К553УД2 приведены на рисунке 4.3. Следует помнить, что на принципиальных схемах устройств на основе ОУ допускается не указывать имеющиеся цепи питания и стандартные схемы коррекции.

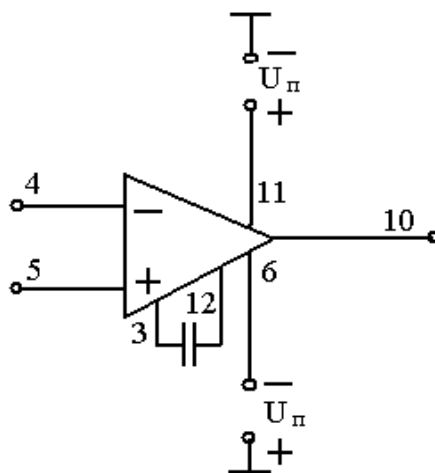


Рисунок 4.3 – Схема выводов ОУ К553УД2

В цепь коррекции, к выводам 3 и 12 подключается конденсатор емкостью 30 пФ.

Основные параметры ОУ К553УД2: $K_y = 20 \cdot 10^3$, $U_{CM} = 7,5$ мВ, $I_{BX} = 1,5$ мкА, $f_1 = 1$ МГц, $U_{ВЫХ}/t = 0,5$ В/мкс, $U_{П} = 6 - 15$ В.

Лабораторное задание

1. Определить предельное значение коэффициента усиления ОУ (K_y).

Вследствие значительной величины K_y его непосредственное измерение затруднительно. Поэтому это значение K_y получают в результате расчета.

1.1. Собрать схему согласно рисунку 4.4. Напомним, что схема частотной коррекции не показана, хотя и должна быть собрана. В дальнейшем будут опущены и элементы питания E1 и E2.

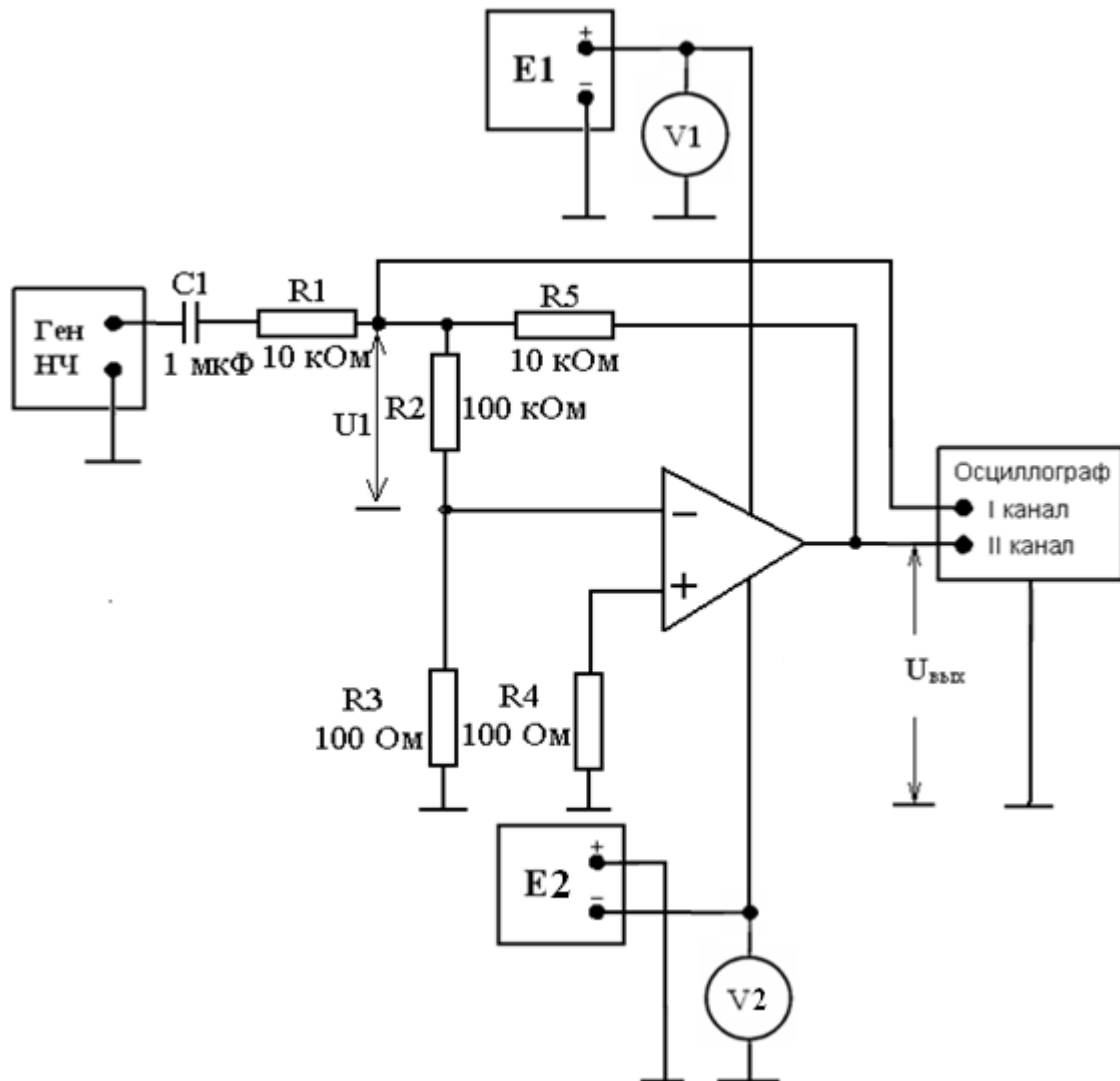


Рисунок 4.4 – Схема для определения коэффициента усиления ОУ

1.2. Установить напряжение источников питания E1 и E2 равным 10 В, на вход схемы от генератора подать синусоидальный сигнал с амплитудой $U_{\Gamma} = 1\text{В}$ и частотой $f_{\Gamma} = 20 - 50\text{ Гц}$. К выходу схемы подключить осциллограф, при этом на экране осциллографа должен наблюдаться неискаженный сигнал (если наблюдаются искажения, то необходимо уменьшить U_{Γ}).

1.3. С помощью осциллографа измерить переменные напряжения U_1 и $U_{\text{ВЫХ}}$, затем рассчитать K_y по формуле:

$$K_y = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_1} \cdot \frac{R_2}{R_3}$$

2. Определить напряжение смещения ($U_{\text{СМ}}$) и входной ток ($I_{\text{ВХ}}$) операционного усилителя. По причине малости этих величин непосредственное измерение $U_{\text{СМ}}$ и $I_{\text{ВХ}}$ затруднительно и поэтому их значения определяют расчетным путем.

2.1. Собрать схему согласно рисунку 4.5 (на схеме источники питания и цепи коррекции не показаны)

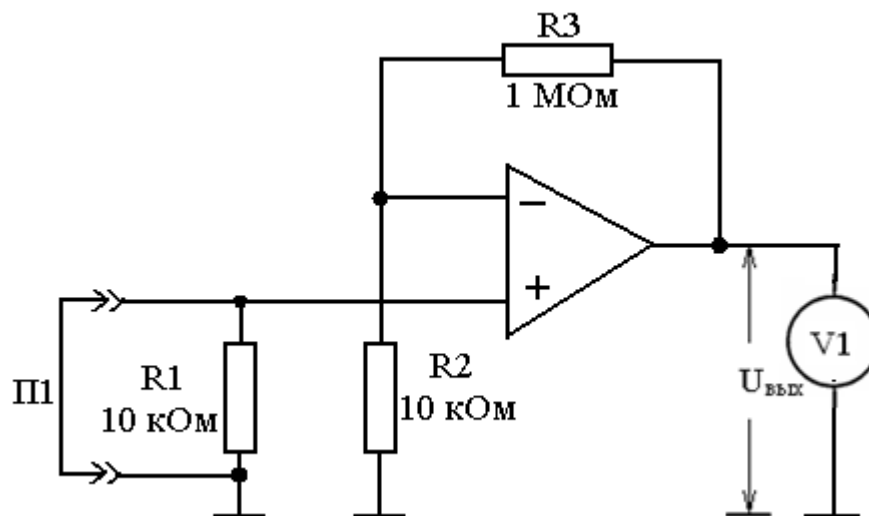


Рисунок 4.5 – Схема для определения напряжения смещения
и входного тока ОУ

2.2. Установить перемычку П1 (вместо резистора R1), соединяющую неинвертирующий вход ОУ (на схеме со знаком “+”) с общим проводом. Измерить с помощью вольтметра величину постоянного напряжения $U_{\text{ВЫХ1}}$.

2.3. Удалить перемычку П1 и установить между неинвертирующим входом ОУ и общим проводом резистор R1. При этом показания вольтметра изменятся. Записать их, обозначив $U_{\text{ВЫХ } 2}$.

2.4. Рассчитать (с учетом знаков $U_{\text{ВЫХ } 1}$ и $U_{\text{ВЫХ } 2}$) величины напряжения смещения и входного тока ОУ

$$U_{\text{CM}} = |U_{\text{ВЫХ } 2} - U_{\text{ВЫХ } 1}| * \frac{R1}{R3}$$

$$I_{\text{BX}} = \frac{U_{\text{CM}}}{R2}$$

3. Измерить скорость нарастания выходного напряжения ОУ ($U_{\text{ВЫХ}}$).

3.1. Собрать схему в соответствии с рисунком 4.6 (на схеме источники питания и цепи коррекции не показаны). К выходу схемы подключить осциллограф. На вход схемы подать от генератора синусоидальный сигнал частотой 0,5 - 1 кГц. Напряжение генератора ($U_{\text{Г}}$) установить таким, чтобы $U_{\text{ВЫХ}}$ каскада на ОУ было близко к максимально возможному, т.е. выходной синусоидальный сигнал был близок к ограничению, но еще не ограничивался.

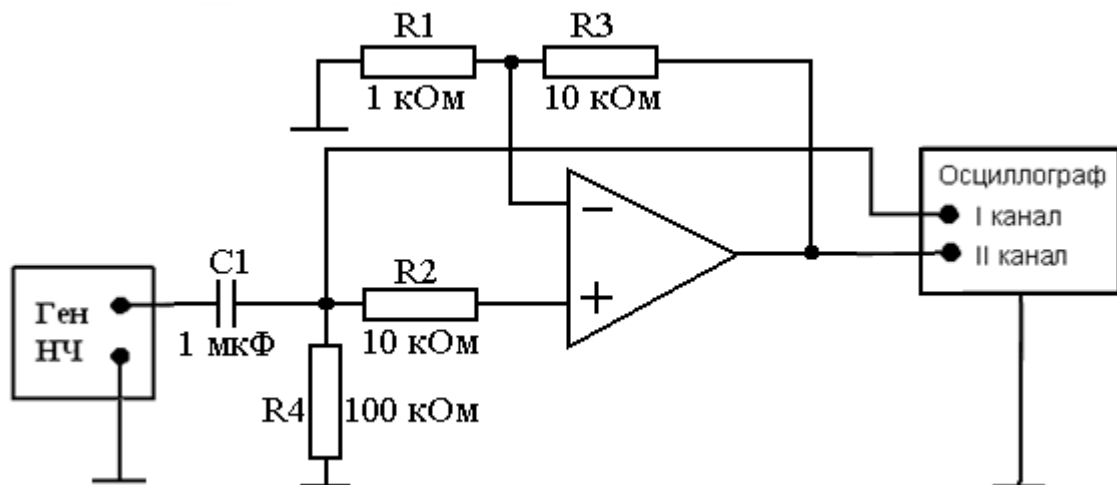


Рисунок 4.6 – Схема для измерения скорости нарастания
выходного напряжения ОУ

3.2. Увеличивая частоту генератора, наблюдайте за осциллограммой выходного сигнала. Наряду с уменьшением размаха, он все более приближается к треугольному (рисунок 4.7).

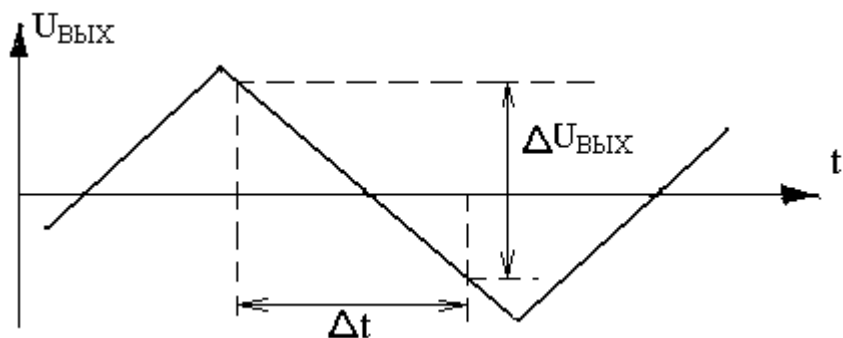


Рисунок 4.7 – Осциллограмма выходного напряжения для измерения скорости нарастания выходного напряжения ОУ

3.3. Установив такую частоту генератора, чтобы выходной сигнал имел вид как на рисунке 4.7, а также откалибровав усиление в канале и скорость развертки осциллографа, измерить $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ и Δt .

3.4. Пользуясь результатами измерений, рассчитать максимальную скорость нарастания выходного сигнала
$$S = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t}.$$

4. Исследовать операционный усилитель с помощью компьютерного моделирования.

Исследование операционного усилителя с помощью компьютерного моделирования производится в программной среде Multisim.

4.1. Построить на экране монитора компьютера схему (рисунок 4.8). Использовать ОУ моделей default или lm (задается преподавателем), вольтметры перевести в режим измерения переменного напряжения.

Включить схему, убедиться, что нет искажения выходного сигнала (если есть искажения, то уменьшить амплитуду входного синусоидального сигнала) и замерить переменные напряжения на входе и выходе схемы. Вычислить коэффициент усиления ОУ (по формуле п. 1.3).

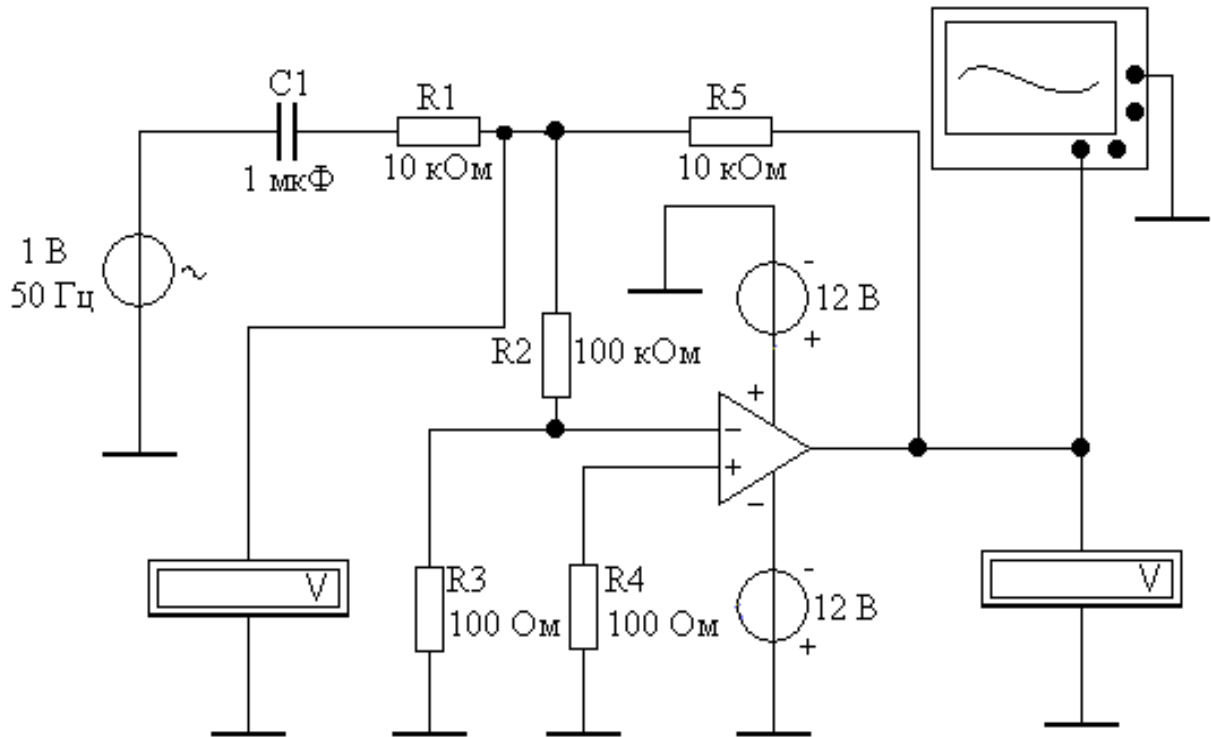


Рисунок 4.8 – Схема для измерения коэффициента усиления ОУ

4.2. Построить на экране монитора компьютера схему (рисунок 4.9)

Вольтметр перевести в режим измерения постоянного напряжения. Включить схему и зафиксировать показания вольтметра ($U_{\text{ВЫХ2}}$). Выключить схему, удалить R1 (неинверсионный вход ОУ закоротить на землю). Включить схему, зафиксировать показания вольтметра ($U_{\text{ВЫХ1}}$). Рассчитать напряжение смещения и входной ток по формулам (п. 2.4).

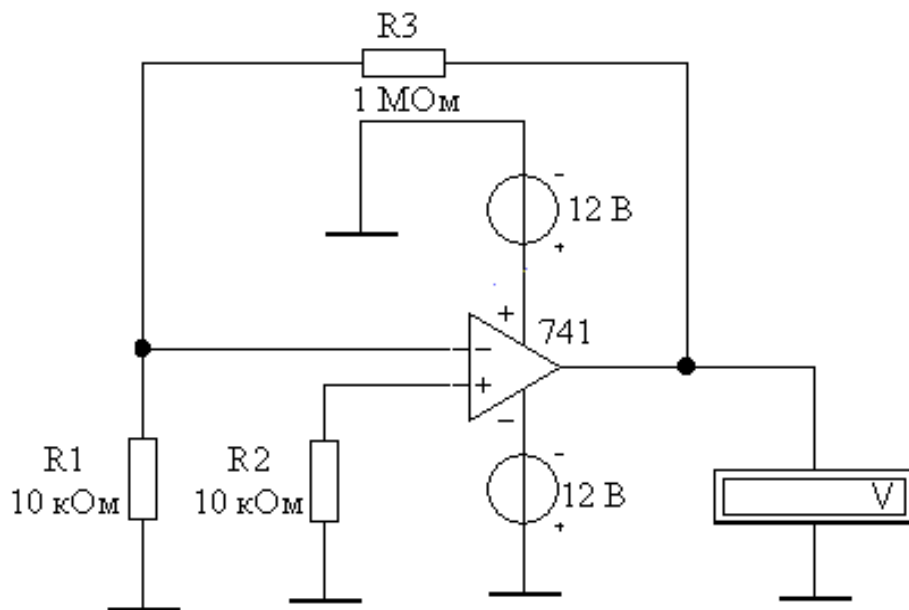


Рисунок 4.9 – Схема для измерения напряжения смещения и входного тока

4.3. Построить на экране монитора компьютера схему (рисунок 4.10). Частоту генератора установить 0,5 – 1 кГц. Вольтметр установить в режим измерения переменного напряжения. Изменяя напряжение генератора добиться, чтобы $U_{\text{ВЫХ}}$ каскада на ОУ было близко к максимально возможному, т.е. выходной синусоидальный сигнал был близок к ограничению, но еще не ограничивался. Увеличивая частоту генератора наблюдайте за осциллограммой выходного сигнала. Наряду с уменьшением размаха, он все более приближается к треугольному. Получив вид осциллограммы выходного сигнала как на рисунке 4.7, с помощью визиров осциллографа измерьте значения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ и Δt .

Пользуясь результатами измерений, рассчитать максимальную скорость

нарастания выходного сигнала
$$S = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta t}.$$

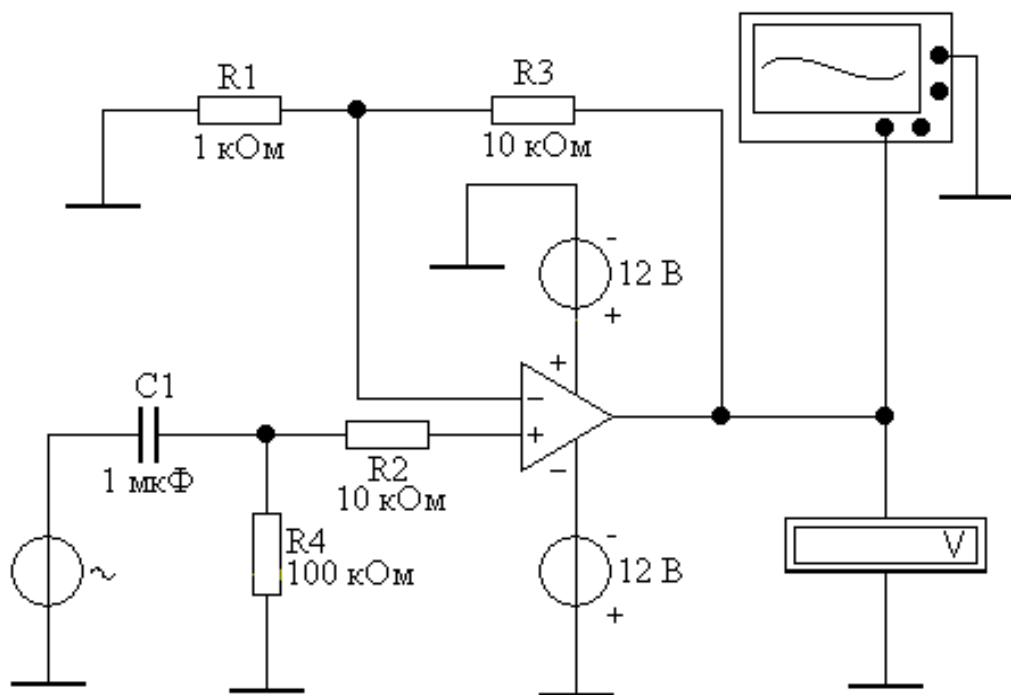


Рисунок 4.10 – Схема для измерения скорости нарастания выходного сигнала

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- паспортные данные и схемы коррекции исследуемого ОУ;

- схемы измерений, графики и значения измеренных параметров ОУ;
- формулы, значения рассчитанных параметров ОУ.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к параметрам “идеального” операционного усилителя?
2. Почему операционные усилители не могут работать без коррекции частотной характеристики?
3. Поясните смысл параметра напряжение сдвига (смещения) операционного усилителя.
4. Поясните физический смысл параметров: средний входной ток и разность входных токов операционного усилителя. При каких входных сигналах они измеряются?
5. Поясните физический смысл параметра - скорость нарастания выходного напряжения. Можно ли его определить, зная амплитудно-частотную характеристику операционного усилителя? Если нет, то почему?

Лабораторная работа № 5

Исследование интегральных схем транзисторно-транзисторной логики

Цель работы:

- изучить электрические параметры интегральных схем транзисторно-транзисторной логики.

Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе необходимо изучить конспект лекций. Основное внимание следует уделить физическому смыслу и методам измерений основных электрических параметров логических микросхем, а также схемотехническим особенностям ТТЛ–схем.

Статические параметры могут быть определены с помощью графика передаточной характеристики $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ (рисунок 5.1.).

По графику передаточной характеристики определяют уровень логического нуля U^0 и уровень логической единицы U^1 (точки А и В определяются пересечением характеристики с ее зеркальным отражением).

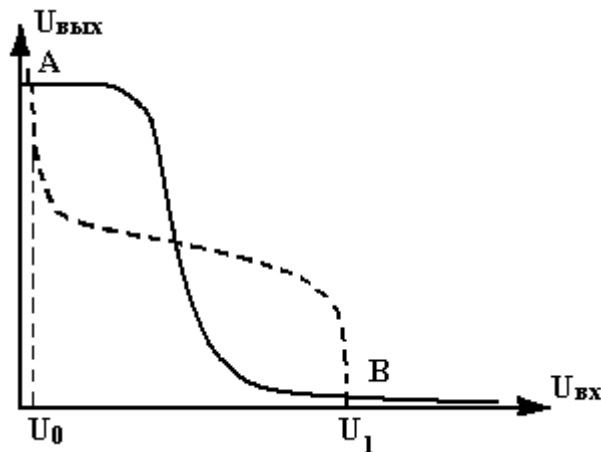


Рисунок 5.1 – График передаточной характеристики логического элемента
2И-НЕ

Быстродействие микросхем определяет среднее время задержки распространения сигнала

$$t_{\text{зд ср}} = 1/2 (t_{\text{зд}}^{0,1} + t_{\text{зд}}^{1,0}),$$

где $t_{зд}^{0,1}$ и $t_{зд}^{1,0}$ - времена задержки переднего и заднего фронтов импульса, измеряемые на уровне 0.5 от амплитуды импульса.

Экономичность микросхемы характеризует средняя потребляемая мощность (в состояниях ноль и единица)

$$P_{cp} = 1/2 (P^0 + P^1).$$

Интегральное качество микросхемы определяет синтетический параметр – работа переключения

$$A_{ПЕР} = t_{зд\text{ ср}} \cdot P_{cp}.$$

В настоящее время элементной базой для микросхем среднего и высокого быстродействия являются элементы транзисторно–транзисторной логики (ТТЛ). Транзисторно-транзисторная логика имеет большое число разновидностей (ИС, БИС, СБИС) и модификаций (от микромощных до сверхбыстродействующих ЛЭ) и выпускается в виде семейств, совместимых друг с другом по логическим сигналам, диапазонам условий эксплуатации и конструктивному исполнению.

Лабораторная работа выполняется на установке «Электронные приборы» и в ней используется микросхема КР1533ЛА3 (К155ЛА3), в состав которой входят 4 схемы 2И-НЕ. Состав, расположение выводов и принципиальная схема одного элемента 2И-НЕ приведены на рисунке 5.2.

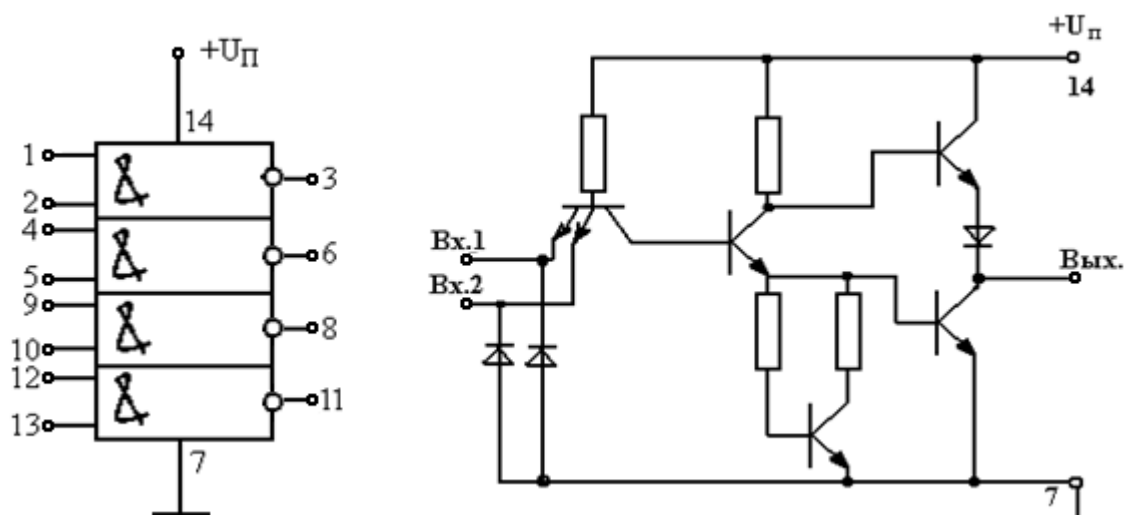


Рисунок 5.2 - Расположение выводов и принципиальная схема одного элемента 2И-НЕ микросхемы КР1533ЛА3

Основные параметры микросхемы: напряжение питания $U_{\Pi} = 5 \text{ В} + 5\%$; допустимое входное напряжение $U_{\text{ВХ}} = 0 - 5 \text{ В}$; уровни логических сигналов на выходе $U^1_{\text{ВЫХ}} \geq 2,4 \text{ В}$, $U^0_{\text{ВЫХ}} \leq 0,4 \text{ В}$; время задержки распространения $t_{\text{ЗАД}} \leq 15 \text{ нс}$.

Лабораторное задание

1. Снять передаточную характеристику логического элемента 2И-НЕ.

Собрать схему (рисунок 5.3), используя любую из четырех схем 2И-НЕ микросхемы КР1533ЛА3.

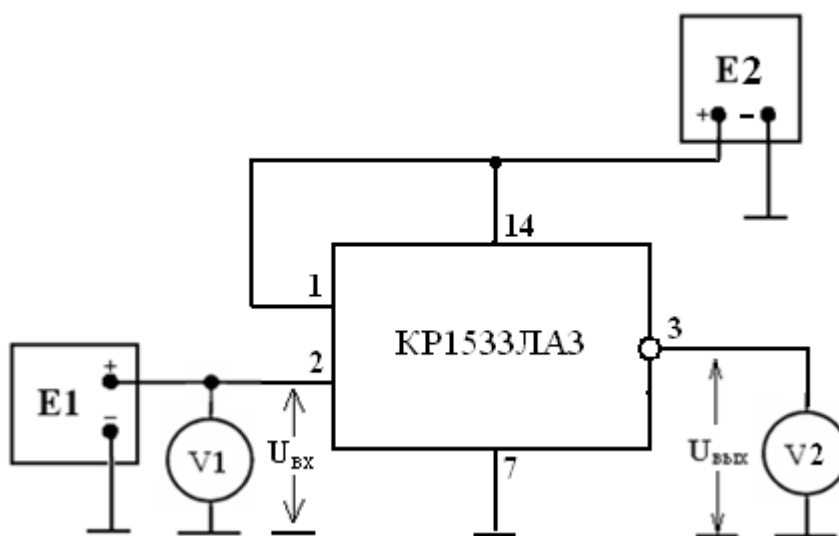


Рисунок 5.3 – Схема для измерения передаточной характеристики

Установить напряжение питания $E2 = 5 \text{ В}$. На один из входов ИМС подать входное напряжение, а второй (не используемый) подключить к «плюсу» источника питания. Изменяя входное напряжение $E1$ в интервале $0 \dots 5 \text{ В}$, снять передаточную $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ характеристику. Результаты измерений внести в таблицу 5.1, построить график.

Таблица 5.1

$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$											

Измерить ток, потребляемый от источника питания при $U_{\text{ВХ}} = U^0 = 0,4 \text{ В}$ и при $U_{\text{ВХ}} = U^1 = 2,4 \text{ В}$. Рассчитать среднюю потребляемую мощность.

2. Измерить нагрузочную способность микросхемы.

Использовать схему исследования из предыдущего пункта. Подать на вход ИМС паспортное значение напряжения логического нуля $U_{ВХ} = 0,4В$. Подключая к выходу ИМС сопротивления нагрузки $R_H = 10\text{ кОм}$, 1 кОм , 470 Ом , 100 Ом , снять нагрузочную выходную характеристику $U_{ВЫХ} = f(R_H)$. Результаты измерений внести в таблицу 5.2, построить график.

Таблица 5.2

R_H , кОм	10	5	1	0,5	0,1
$U_{ВЫХ}$, В					

3. Исследовать быстродействие логической микросхемы. Собрать схему (рисунок 5.4).

Обратить внимание, что четыре микросхемы включены последовательно, чтобы увеличить время задержки для облегчения измерений (не забудьте полученный результат разделить на четыре).

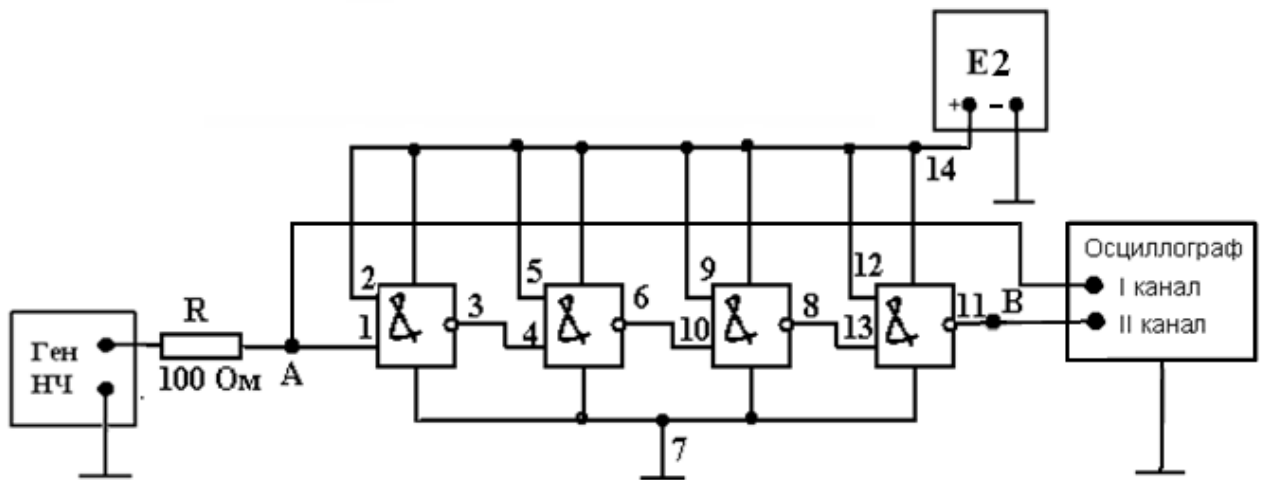


Рисунок 5.4 – Схема для измерения быстродействия логической микросхемы

К входу (точка А) и выходу (точка В) подключить осциллограф. От генератора подать на вход прямоугольные импульсы амплитудой 3...4В и частотой следования 100 кГц - 1 МГц. На экране осциллографа измерить время задержки переднего $t_{зд}^{0,1}$ и заднего $t_{зд}^{1,0}$ фронтов. Рассчитать среднее время задержки сигнала $t_{зд\text{ ср}}$ и работу переключения $A_{\text{ПЕР}}$.

4. Исследовать логический элемент 2И - НЕ с помощью компьютерного моделирования.

Исследование логической микросхемы с помощью компьютерного моделирования производится в программной среде Multisim.

4.1. Построить на экране компьютера схему (рисунок 5.5) для исследования передаточной характеристики микросхемы. Микросхема выбирается из подменю Logic Gates, тип NAND, номера 7400, 7403, 7426, 7437, 7438, 7439, 74132.

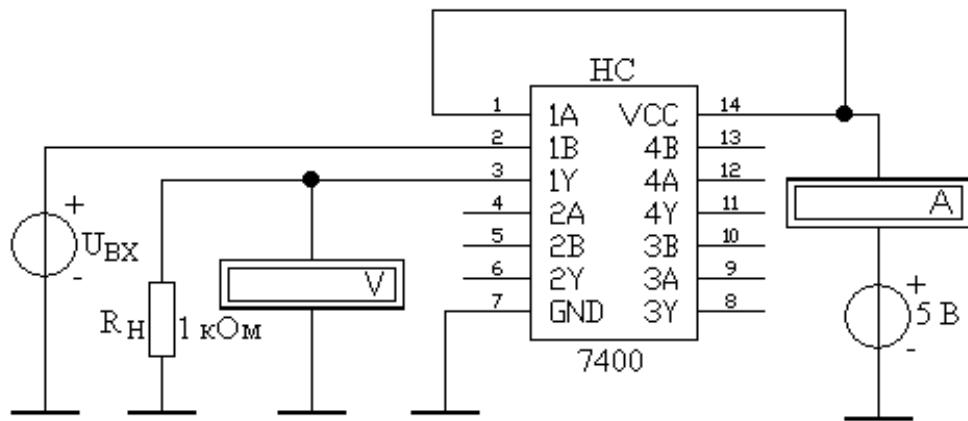


Рисунок 5.5 - Схема для измерения передаточной характеристики

Изменяя входное напряжение $U_{ВХ}$ в интервале 0...5 В, снять передаточную $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ характеристику. Результаты измерений внести в таблицу, построить график.

Измерить ток, потребляемый от источника питания при $U_{ВХ} = U^0 = 0$ В и при $U_{ВХ} = U^1 = 5$ В. Рассчитать среднюю потребляемую мощность.

4.2. Измерить нагрузочную способность микросхемы.

Использовать схему исследования из предыдущего пункта. Подать на вход ИМС напряжение логического нуля $U_{ВХ} = 0$ В. Подключая к выходу ИМС сопротивления нагрузки $R_H = 100$ кОм, 10 кОм, 1 кОм, 100 Ом, 10 Ом, снять нагрузочную выходную характеристику $U_{ВЫХ} = f(R_H)$. Построить график.

4.3. Построить на экране компьютера схему (рисунок 5.6) для исследования быстродействия логической микросхемы.

Обратите внимание, что четыре микросхемы 2И – НЕ включены последовательно, чтобы увеличить время задержки для облегчения измерений (не забудьте полученный результат разделить на четыре).

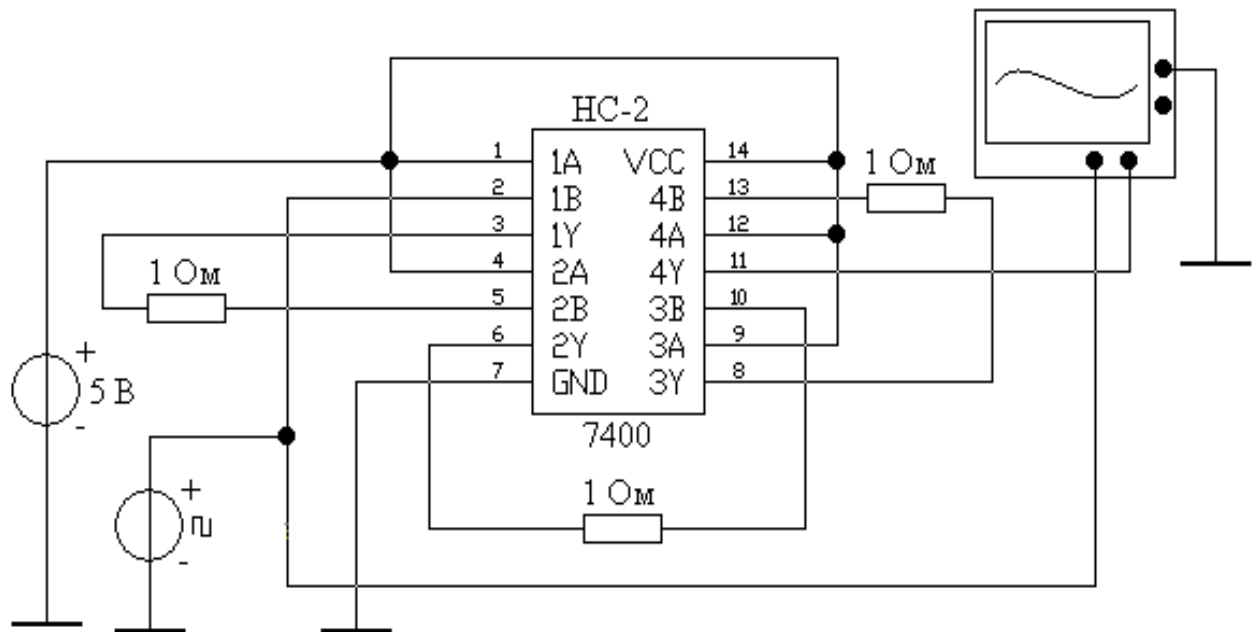


Рисунок 5.6 - Схема для измерения быстродействия логической микросхемы

В генераторе прямоугольных импульсов установить амплитуду 5 В и частоту 1 МГц. С помощью осциллографа измерить время задержки переднего $t_{зд}^{0,1}$ и заднего $t_{зд}^{1,0}$ фронтов. Рассчитать среднее время задержки сигнала $t_{зд\text{ ср}}$ и работу переключения $A_{\text{пер}}$.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- структурную схему микросхемы КР1533ЛА3 с нумерацией выводов;
- паспортные данные микросхемы;
- схемы измерений и исследований;
- таблицы с результатами измерений и графики полученных зависимостей;
- измеренные и вычисленные значения параметров ИМС.

Контрольные вопросы

1. С какой целью в схемах ТТЛ используется сложный инвертор?
2. Каковы преимущества схем ТТЛ перед схемами диодно-транзисторной (ДТЛ) логики?

Лабораторная работа № 6

Исследование интегральных микросхем на интегральных КМДП - транзисторах

Цель работы:

- изучить функциональные возможности и электрические параметры интегральных схем на КМДП-транзисторах.

Подготовка к лабораторной работе

Изучить конспект лекций по данной теме. Основное внимание уделить особенностям схемотехнических решений и параметрам схем на КМДП-транзисторах.

В ЛЭ кремниевых микросхем используют МДП-транзисторы с каналами одного (обычно n) или обоих типов проводимости (комплементарные транзисторы). Первые обеспечивают минимальную площадь, занимаемую ЛЭ на кристалле, а вторые — минимальную потребляемую мощность, более высокие быстродействие и помехоустойчивость. Практически бесконечное входное сопротивление МДП-транзисторов позволяет создавать ЛЭ динамического типа, обладающие малыми занимаемой площадью и потребляемой мощностью при сравнительно невысоком быстродействии. Логические элементы арсенид-галлиевых микросхем сверхвысокого быстродействия создают на МЭП-транзисторах с каналами n -типа.

Инвертор на комплементарных транзисторах. Схема инвертора (рисунок 6.1) содержит транзисторы VT_n и VT_p с каналами соответственно n - и p -типа.

При $U_{BX} = U^1 = U_{ин}$ транзистор VT_n открыт, а VT_p закрыт. На выходе получаем $U_{ВЫХ} = U^0 \approx 0$. Если $U_{BX} = U^0 = 0$, то, наоборот, транзистор VT_n закрыт, а VT_p открыт и $U_{ВЫХ} = U^1 = U_{ин}$. В обоих состояниях ток, потребляемый от источника питания, практически равен нулю. Предполагается, что выход инвертора соединен с входами аналогичных инверторов-нагрузок. Таким образом, мощность, потребляемая в статическом режиме, практически

равна нулю, что является важнейшим преимуществом по сравнению с любыми другими микросхемами.

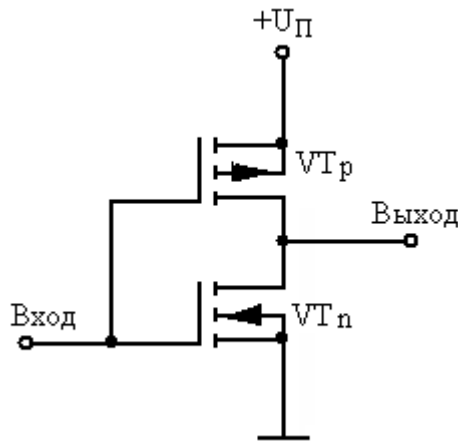


Рисунок 6.1 – Схема инвертора на комплементарных транзисторах

Логические элементы на комплементарных (КМДП) транзисторах.

Для реализации функции И-НЕ применяется последовательное включение n -канальных и параллельное включение p -канальных транзисторов (рисунок 6.2а). При тех же геометрических размерах транзисторов, что и в инверторе, ток, задаваемый n -канальными транзисторами в открытом состоянии, уменьшается в m раз, а ток, задаваемый p -канальными транзисторами, увеличивается в m раз. Поэтому ЛЭ И-НЕ имеет характеристики и параметры, близкие к инвертору.

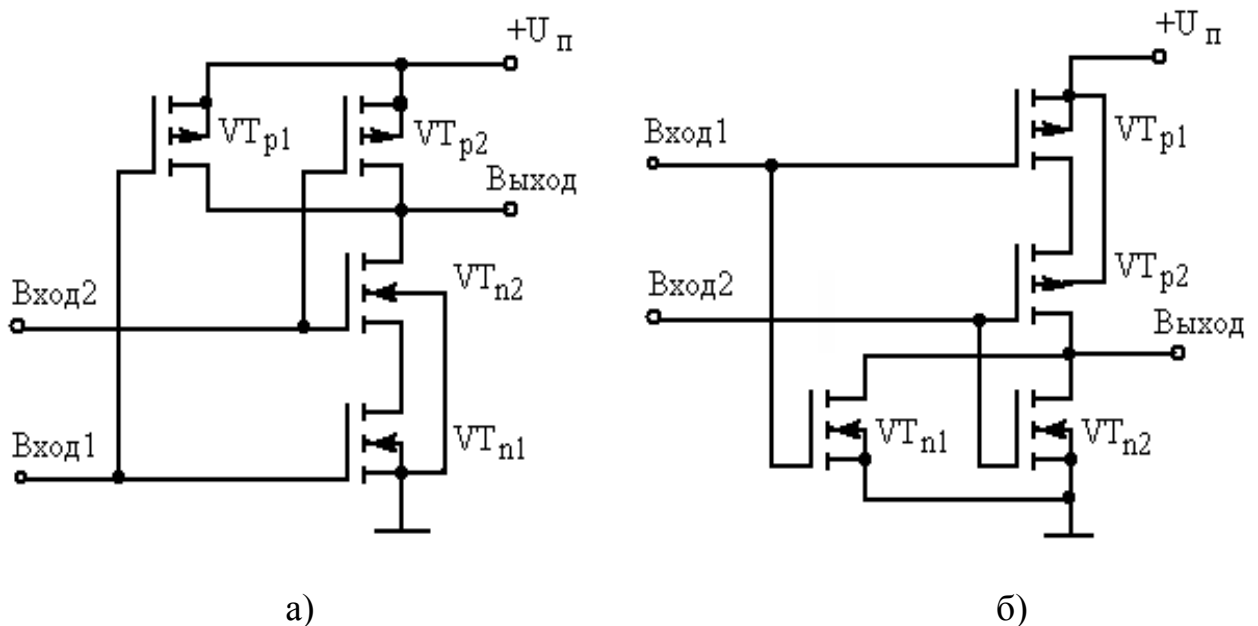


Рисунок 6.2 – Схемы логических элементов на КМДП – транзисторах:

а) элемент 2И-НЕ, б) элемент 2ИЛИ-НЕ

Для реализации функции ИЛИ-НЕ применяется параллельное включение n-канальных и последовательное включение p-канальных транзисторов (рисунок 6.2.6). Логический элемент ИЛИ-НЕ имеет характеристики и параметры, близкие к характеристикам и параметрам инвертора.

В работе используются транзисторы микросхемы К176ЛП1 (рисунок 6.3), которая представляет собой универсальный логический элемент КМДП-структуры (при соответствующей коммутации может быть использован в качестве трех элементов НЕ, элемента НЕ с большим коэффициентом разветвления, элемента 3И-НЕ, элемента 3ИЛИ-НЕ и триггерной ячейки).

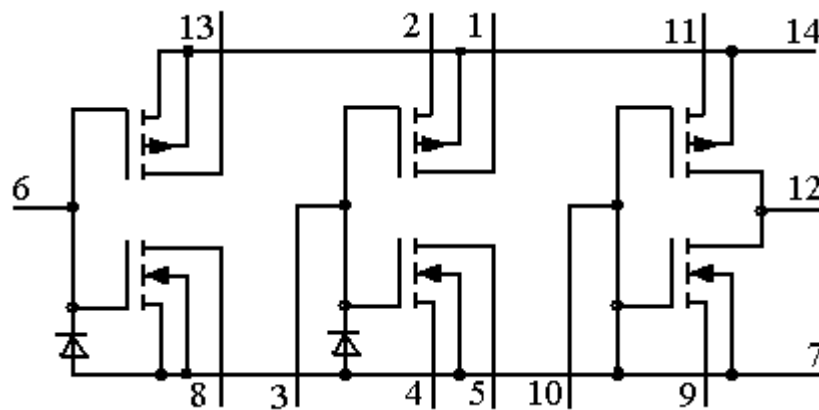


Рисунок 6.3 – Схема микросхемы К176ЛП1

Основные электрические параметры: напряжение питания $U_{\text{п}} = 9\text{В} + 5\%$, уровни логических сигналов $U_{\text{вых}}^0 \leq 0,3\text{В}$; $U_{\text{вых}}^1 \geq 8,2\text{В}$; потребляемый ток - не более 0,3 мА; среднее время задержки распространения $t_{\text{зад}} \leq 200 \text{ нс}$.

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

Схемы исследования собираются на лабораторной установке «Электронные приборы».

Лабораторное задание

1. Внести в отчет принципиальную схему и параметры ИМС К176ЛП1. Составить и внести в отчет принципиальные схемы элементов 2ИЛИ-НЕ и 2И-НЕ, получаемые путем соответствующих коммутаций выводов ИМС К176ЛП1.
2. Снять передаточную характеристику микросхемы.

Собрать схему (рисунок 6.4) для исследования передаточной характеристики ключа на комплементарных (КМДП) транзисторах (сопротивление 150 кОм имитирует нагрузку). Для исследования может быть выбрана любая пара транзисторов ИМС.

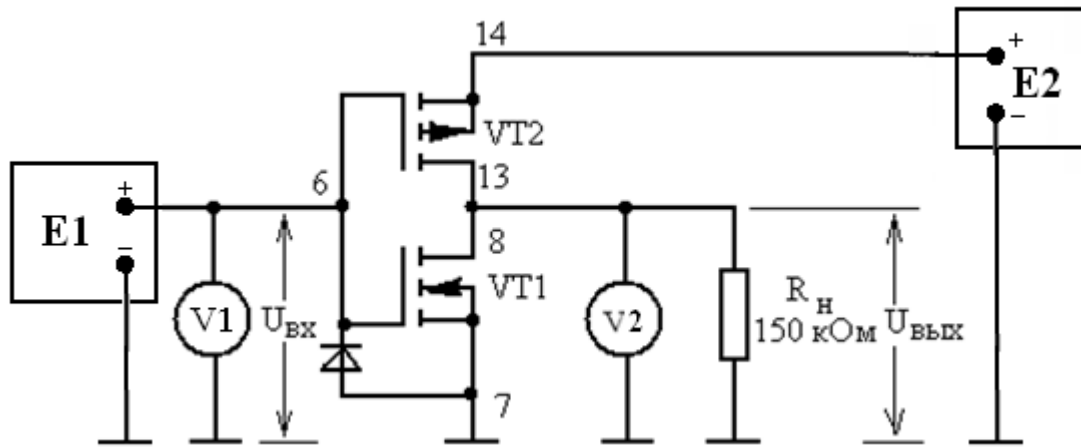


Рисунок 6.4 – Схема для измерения передаточной характеристики ключа на КМДП – транзисторах

Изменяя напряжение источника E1 в пределах 0...9 В, снять передаточную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$. Результаты измерений занести в таблицу 6.1. Построить график.

Таблица 6.1

$U_{\text{ВХ}}, \text{ В}$											
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$											

3. Измерить среднее время задержки распространения сигнала.

Собрать схему (рисунок 6.5). Для этого к входу и выходу инвертора подключить осциллограф. Прямоугольные импульсы от генератора сигналов ГЗ – 112 частотой 1 кГц и амплитудой примерно 9 В подать на вход инвертора. Получить на экране осциллографа изображения входного и выходного импульсов и измерить задержки переднего $t^{1,0}$ и заднего $t^{0,1}$ фронтов выходного импульса на уровне 0,5 амплитудного значения.

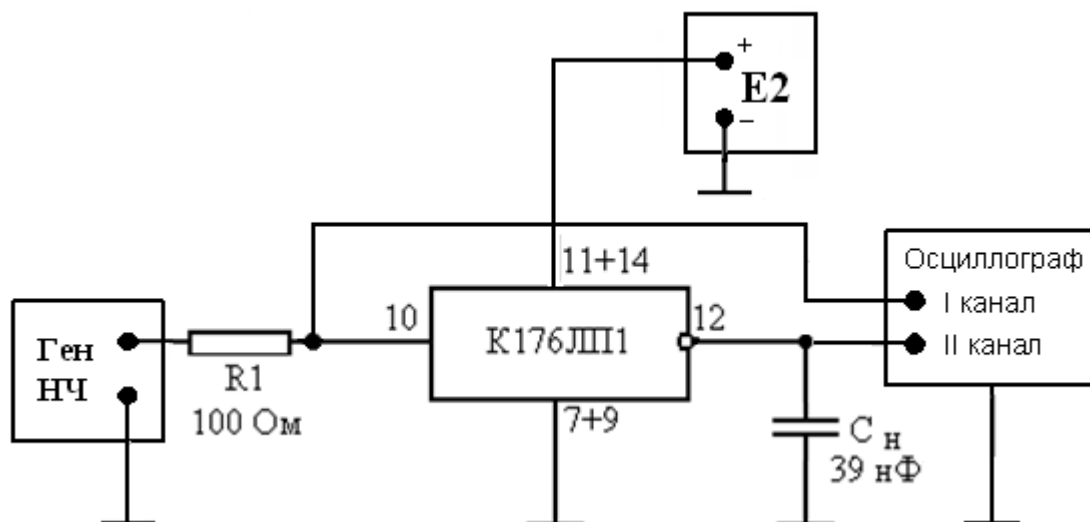


Рисунок 6.5 – Схема для измерения времени задержки распространения сигнала

4. Изучить функциональные возможности ИМС.

4.1. Исследовать схему 2И-НЕ.

Используя две любые пары комплементарных транзисторов ИМС самостоятельно начертить и собрать схему 2И-НЕ. Подавая на входы различные комбинации логических сигналов ($U = 0$, $U = E_{пит}$), составить таблицу состояний схемы 2И-НЕ.

X1	X2	Y
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

Примечание: для подачи на вход логической единицы, его нужно подсоединить к выводу источника питания, для подачи на вход логического нуля, его необходимо заземлить. Для индикации выходного сигнала используется вольтметр мультиметра.

4.2. Исследовать схему 2ИЛИ-НЕ.

Используя две любые пары комплементарных транзисторов ИМС, самостоятельно начертить и собрать схему 2ИЛИ-НЕ. Подавая на входы

различные комбинации логических сигналов ($U = 0$, $U = E_{\text{пит}}$), составить таблицу состояний схемы 2ИЛИ-НЕ.

5. Исследовать схемы на КМДП-транзисторах с помощью компьютерного моделирования.

Исследование логической микросхемы с помощью компьютерного моделирования производится в программной среде Multisim.

5.1. Снять передаточную характеристику схемы НЕ на КМДП-транзисторах.

Построить на экране компьютера схему (рисунок 6.6) для исследования передаточной характеристики схемы.

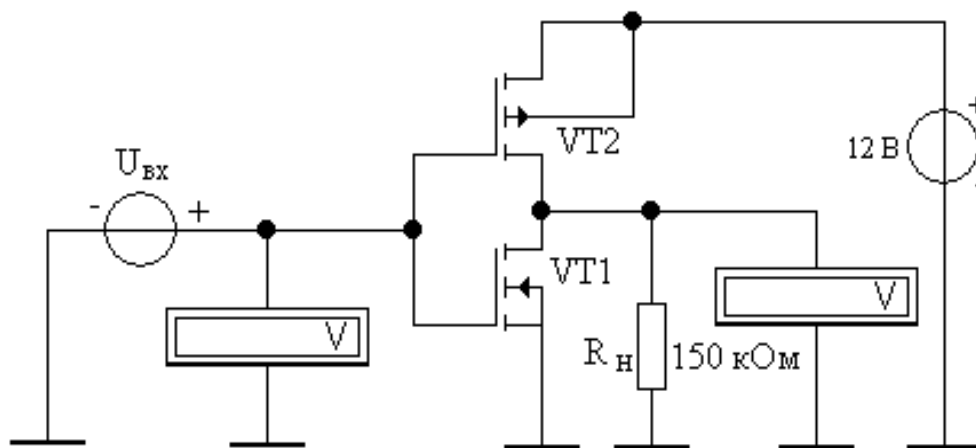


Рисунок 6.6 – Схема для измерения передаточной характеристики инвертора

В качестве активного транзистора использовать МДП-транзистор n-типа Default ideal, Toshiba серии M2SK или Intrntl 1 серии IRF. Марка транзистора задается преподавателем. В качестве нагрузки используется идеальный МДП-транзистор p-типа. Изменяя напряжение источника U_{BX} в пределах 0...12 В, снять передаточную характеристику $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$. Результаты измерений занести в таблицу. Построить график.

5.2. Исследовать схему 2И-НЕ.

Используя рисунок 6.7, построить на экране компьютера схему 2И-НЕ из идеальных КМДП-транзисторов.

Подавая на входы различные комбинации логических сигналов, путем переключения ключей А и S составить таблицу состояний схемы 2И-НЕ.

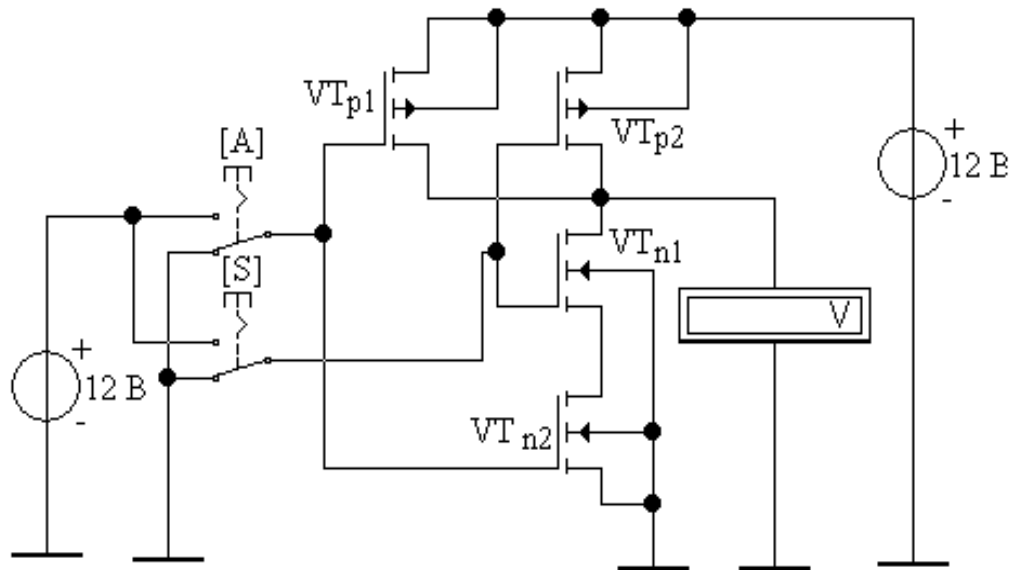


Рисунок 6.7 – Схема для исследования логического элемента 2И-НЕ

5.3. Исследовать схему 2ИЛИ-НЕ.

Самостоятельно начертить и собрать схему 2ИЛИ-НЕ и повторить исследования по предыдущему пункту для этой схемы, составить таблицу истинности.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- электрическую схему и параметры ИМС К176ЛП1;
- схемы исследования;
- таблицы и графики снятых зависимостей;
- таблицы истинности исследуемых логических элементов.

Контрольные вопросы

1. Чем объясняется исключительно малая потребляемая КМДП схемами мощность в статических состояниях?
2. Пояснить работу инвертора на КМДП-транзисторах.
3. Почему логические схемы на КМДП-транзисторах содержат больше транзисторов, чем аналогичные схемы на транзисторах одного типа?
4. В чем различие коммутации выводов микросхемы К176ЛП1 для логических элементов 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ?

Лабораторная работа № 7

Исследование интегральных оптронов

Цель работы:

- изучить особенности работы и методики измерения параметров оптронов.

Подготовка к лабораторной работе

Изучить конспект лекций. При изучении следует иметь в виду, что оптроны являются основными структурными элементами оптоэлектроники - одного из современных направлений функциональной микроэлектроники.

Простейший диодный оптрон состоит из трех элементов (рисунок 7.1): фотоизлучателя 1, световода 3 и фотоприемника 2, заключенных в светонепроницаемый герметичный корпус. При подаче на вход электрического сигнала возбуждается фотоизлучатель.

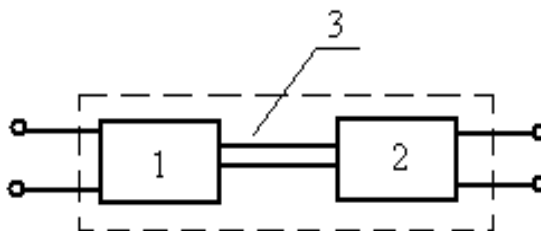


Рисунок 7.1 - Структурная схема диодного оптрона

Световой поток по световоду попадает в фотоприемник, в котором вырабатывается выходной электрический сигнал. Существенной особенностью оптрона является то, что его элементы связаны оптически, а электрически вход и выход изолированы друг от друга. Благодаря этому, легко обеспечивается согласование высоковольтных и низковольтных, а также высокочастотных и низкочастотных цепей. Условное обозначение диодного оптрона приведено на рисунке 7.2.

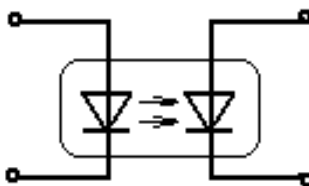


Рисунок 7.2 - Условное обозначение диодного оптрона

В качестве фотоизлучателей оптронов получили распространение инжекционные светодиоды, в которых испускание света определяется механизмом рекомбинации электронов и дырок.

Известно, что физическое явление, лежащее в основе принципа действия светодиода, называется электролюминисценцией. Его сущность заключается в том, что в некоторых полупроводниковых материалах процесс рекомбинации электронов и дырок сопровождается излучением кванта света. Напомним, что в кремнии и германии энергия рекомбинирующих частиц рассеивается на колебаниях решетки (акустических фононах).

Для преобразования световых сигналов в электрические в основном используются фотодиоды (а также фоторезисторы, фототранзисторы и фототиристоры).

Фотодиод представляет собой обычный n - p -переход, чаще всего на основе кремния или германия, обратный ток которого определяется скоростью генерации носителей заряда, порождаемых действием падающего света. Данное явление называется ***внутренним фотоэффектом***.

Обратите внимание, что существуют два режима использования фотодиода: без внешнего питания - вентильный или фотовольтаический режим и с внешним питанием - фотодиодный режим. Фотодиоды, предназначенные для преобразования световой энергии в электрическую без внешнего питания, называют вентильными фотоэлементами. Возникновение фото-ЭДС U_{ϕ} связано с разделением генерированных светом электронно-дырочных пар полем n - p -перехода. При этом происходит накопление дырок в p -области и электронов в n -области, за счет чего на n - p -переходе создается добавочная разность потенциалов. Величина фото-ЭДС U_{ϕ} зависит от уровня оптического сигнала P_{ϕ} и величины сопротивления нагрузки.

Необходимо иметь в виду, что в фотодиодном режиме за счет источника внешнего напряжения фототок i_{ϕ} примерно равен току короткого замыкания вентильного элемента, а падение напряжения от фототока на нагрузке U_{ϕ} при любом сопротивлении нагрузки больше по величине, чем в вентильном

режиме. Следует отметить, что дополнительным преимуществом фотодиодов является высокая линейность световых характеристик i_{Φ} , $U_{\Phi} = f(P_{\Phi})$, позволяющая применять их в оптических линиях связи. Вентильные элементы в основном используются в качестве преобразователей энергии (солнечные батареи).

Обратите внимание, что управление током с помощью света может быть получено и в биполярном транзисторе, причем с существенно большей чувствительностью, чем в фотодиодах, за счет усиления тока базы. Следует отметить, что оптическая генерация носителей в базе фототранзистора эквивалентна введению в базу носителей заряда от внешнего источника. В результате фототок транзистора усиливается в β раз по сравнению с фотодиодом, где β - статический коэффициент усиления тока базы фототранзистора.

Можно выделить следующие основные параметры диодных оптронов:

- максимальный входной ток $I_{BX \max}$;
- максимальное входное напряжение $U_{BX \max}$;
- максимальное выходное обратное напряжение $U_{ВЫХ \text{ ОБР } \max}$;
- входное напряжение U_{BX} - постоянное входное напряжение, соответствующее заданному входному току;
- выходной обратный темновой ток $I_{ВЫХ \text{ ОБР } T}$;
- времена нарастания $t_{НР}$ и спада $t_{СП}$ выходного сигнала - интервалы времени, в течение которых выходной сигнал диодного оптрона изменяется в интервалах 0,1-0,9 и 0,9-0,1 от своего максимального значения;
- коэффициент передачи по току K_i - отношение приращения выходного тока к входному $K_i = (I_{ВЫХ} - I_{ВЫХ \text{ ОБР } T})/I_{ВХ}$.

Лабораторная работа выполняется на лабораторной установке «Электронные приборы». В работе исследуется диодный оптрон АОД101А и транзисторный оптрон АОТ110А. Схемы оптронов представлены на рисунке 7.3 а) и б).

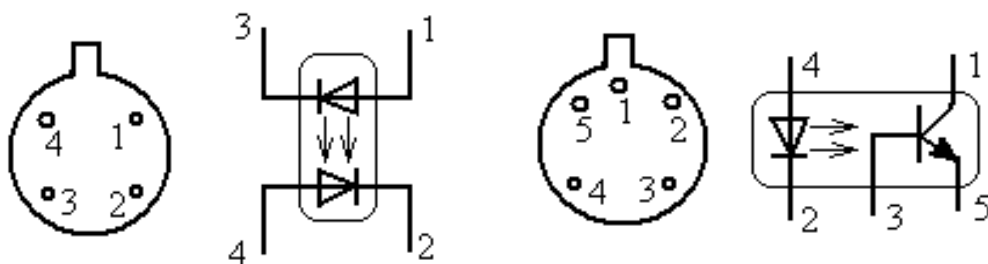


Рисунок 7.3 – Номера выводов и схемы оптронов:

а) диодного, б) транзисторного

Диодный оптрон АОД101А имеет следующие параметры: излучатель – диод арсенидогаллиевый, приемник – кремниевый фотодиод, $I_{ВХ\ MAX} = 20\ \text{мА}$, $U_{ВХ} \leq 1,5\text{В}$ при $I_{ВХ} = 10\ \text{мА}$, $U_{ВХ\ ОБР} \leq 3,5\ \text{В}$, $U_{ВЫХ\ MAX} = 15\text{В}$, коэффициент передачи по току $\geq 1\%$, время нарастания и спада выходного импульса $\leq 100\ \text{нс}$.

Транзисторный оптрон АОТ 110А имеет следующие параметры: излучатель – диод на основе состава галлий – алюминий – мышьяк, приемник – кремниевый составной фототранзистор, режим работы – ключевой, $I_{ВХ\ MAX} = 30\ \text{мА}$, $U_{ВХ} \leq 2\ \text{В}$ при $I_{ВХ} = 25\ \text{мА}$, $I_{ВЫХ} = 200\ \text{мА}$, $U_{ВЫХ} = 30\ \text{В}$, время переключения – 10 – 50 мкс, между выводами 3 и 5 должен быть подключен резистор 0,1 – 1 Мом.

Лабораторное задание

1. Зарисовать принципиальные схемы исследуемых оптронов и выписать их предельные параметры.

2. Исследовать характеристики диодного оптрона.

2.1. Собрать схемы исследования рисунок 7.4. Установить напряжение в источнике питания $E2 = 10\ \text{В}$.

2.2. Изменяя $E1$ от 0 В до значения, когда $U_{ВХ} = 1,5\ \text{В}$, снять входную характеристику оптрона: $I_{ВХ} = f(U_{ВХ})$. Принять $I_{ВХ} = E1/R1$, так как входное сопротивление светодиода много больше $R1$. Результаты измерений занести в таблицу 7.1. Построить график.

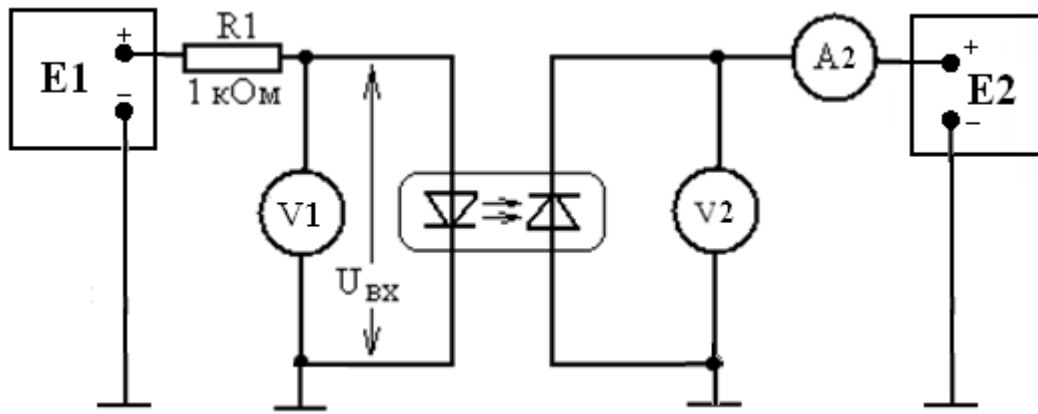


Рисунок 7.4 – Схема для исследования характеристик диодного оптрона

Таблица 7.1.

E1, В								
U_{BX} , В								
I_{BX} , мА								

2.3. Установить $E2 = 0$. Изменяя $E1$, снять передаточную характеристику оптрона при использовании фотovoltaического режима $I_{ВЫХ} = f(I_{ВХ})$. Результаты измерений занести в таблицу 7.2. Построить график.

Таблица 7.2.

E1, В								
$I_{ВЫХ}$, мА								
$I_{ВХ}$, мА								

2.4. Установить $E2 = 5В$. Повторить измерения по п.2.3 для оптрона при использовании фотодиодного режима. Результаты измерений занести в таблицу 7.3, аналогичную 7.2. Построить график.

2.5. Измерить времена нарастания $t_{НР}$ и спада $t_{СП}$ выходного тока оптрона.

Собрать схему исследования, изображенную на рисунке 7.5, включив в цепь светодиода генератор импульсов. Установить на выходе генератора амплитуду импульсов 5 В с частотой следования 10 кГц. К измерительному резистору $R2$ подключить осциллограф. (Другой канал осциллографа используется для измерения амплитуды импульсов на выходе генератора).

Установить $E2 = 5\text{В}$ и по осциллограмме выходного напряжения на $R2$ измерить времена нарастания и спада фронтов импульса.

Установить $E2 = 0$ и повторить измерения времен для фотovoltaического режима.

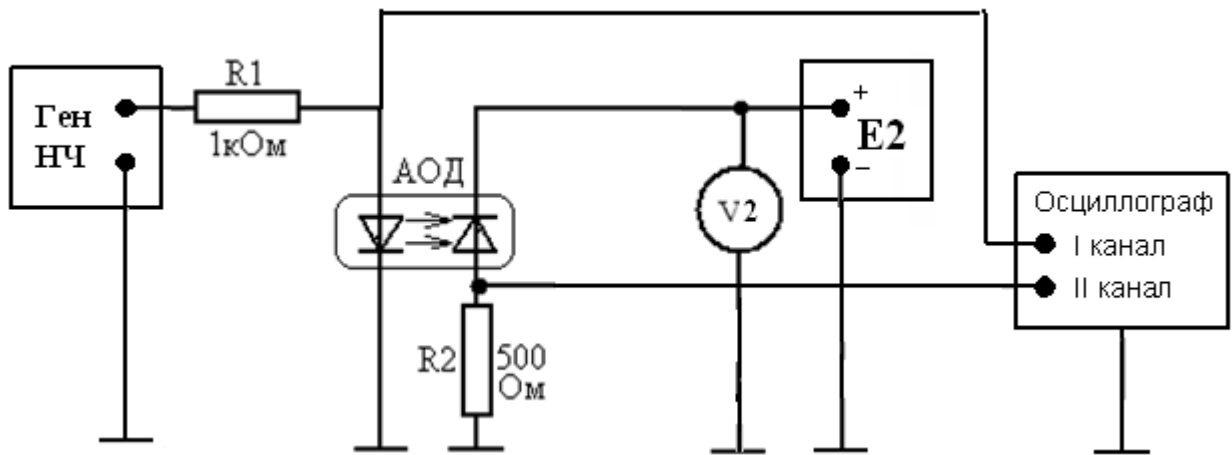


Рисунок 7.5 – Схема для измерения времени нарастания и спада выходного тока оптрона

Рассчитать среднее время задержки распространения сигнала в диодном оптроне для фотодиодного и фотovoltaического режимов по формуле

$$t_{зд\text{ ср}} = \frac{1}{2} \left(\frac{t_{HP}}{2} + \frac{t_{СП}}{2} \right).$$

3. Исследовать характеристики транзисторного оптрона, работающего в режиме ключа. Собрать схему (рисунок 7.7), установить $E2 = 5\text{В}$, $R1 = 1\text{кОм}$, $R2 = 1\text{Мом}$, $R3 = 10\text{кОм}$.

Изменяя $E1$ от 0 до 2В, снять передаточную характеристику транзисторного оптрона $I_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{ВХ}})$; принять $I_{\text{ВХ}} = E1/R1$. Результаты измерений занести в таблицу 7.4, аналогичную 7.2. Построить график.

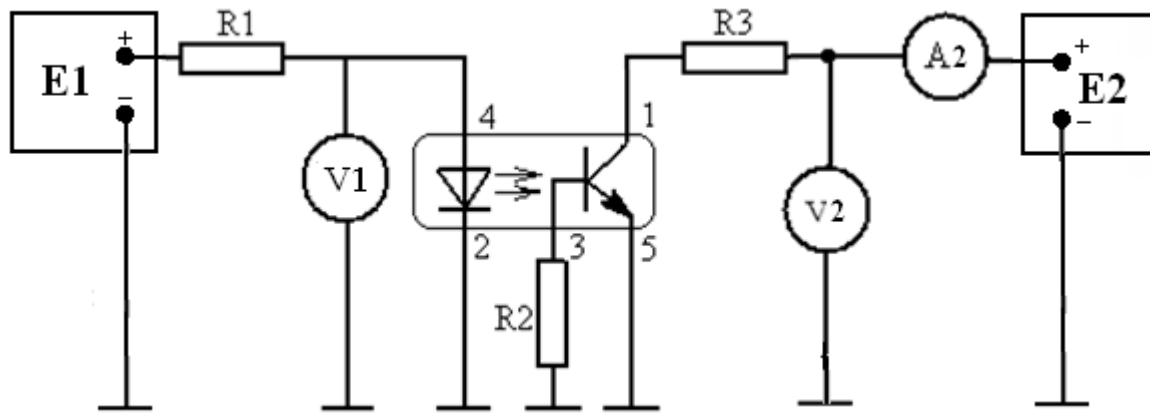


Рисунок 7.6 – Схема для измерения передаточной характеристики транзисторного оптрона

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- предельные параметры и принципиальную схему исследуемого оптрона;
- схемы измерений;
- таблицы и графики снятых зависимостей;
- рассчитанные значения параметров;
- осциллограммы токов и напряжений.

Контрольные вопросы

1. Что такое внутренний фотоэффект?
2. Поясните процесс образования фототока диода. Какой параметр описывает эффективность данного процесса?
3. Почему чувствительность фототранзистора выше, чем фотодиода?
4. В чем причина инерционности фотодиодов?
5. В чем причины инерционности фототранзисторов?
6. Поясните принцип действия светодиода.
7. Почему оптроны используются для развязки электрических цепей?

Литература

1. Бобровников Л.З. Электроника: Учебник для вузов. – СПб.: ЗАО Издательский дом «Питер», 2004.
2. Аваев Н.А. и др. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1991.
3. Кардашев Г.А. Цифровая электроника на персональном компьютере. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003.
4. Среда программирования "Multisim". <https://iowin.net/multisim/> (Дата обращения 06.04.2021).
5. Бочаров Е.И. и др. Электроника. Методические указания к лабораторным работам. – СПб.: СПбГУТ, 2002.
10. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум по элементам телекоммуникационных систем / В.И. Карлащук. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
11. Соколов С.В., Титов Е.В. Электроника: Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия-Телеком, 2013.
12. Описание моделирующих программ "Multisim". <http://cxem.net/software/multisim.php> (Дата обращения 06.04.2021).