

Методические указания
и контрольные задания

по курсу

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Часть 2

Составитель Т.Б.Асеева, доцент

Издание стереотипное. Утверждено на заседании кафедры.

Рецензент Г.С.Берендеева

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Курс «Электротехника и электроника» (Э и Э) ч 2 изучается в 6 семестре. В него вошли вопросы, связанные с основами электрических измерений, элементной базой современных электронных устройств, основами цифровой и аналоговой электроники. Курс Э и Э ч 2 базируется на материалах, изложенных в курсах Физика, Информатика, Высшая математика, Э и Э ч 1.

Целью учебной дисциплины Э и Э ч 2 является изучение студентами основ современной электроники. По курсу Э и Э ч 2 предусмотрен экзамен, на котором студент должен ответить на ряд теоретических вопросов и дать пояснения по задачам, решенным в контрольной работе.

БЮДЖЕТ ВРЕМЕНИ (в часах)

Очная форма	Заочная форма					
	Аудиторная работа			Самостоятельная работа		
	Лекции	Лабораторные работы	Итого	Изучение курса	Выполнение контрольной работы	Итого
100	14	4	18	60	22	82

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники . Учебное пособие для вузов. - М.: Радио и связь, 2000 - 425 с.

Дополнительная

2. Герасимов В. Г. и др. Основы промышленной электроники. – М.: Высшая школа, 1986.

Несмотря на то, что институт организует для студентов очные виды занятий, основной формой изучения курса является самостоятельная работа с книгой. Предлагаемые методические указания должны помогать именно в этой работе.

Рекомендуется после каждого раздела ответить на контрольные вопросы, большая часть которых входит в экзаменационные билеты.

ЗАДАЧИ КУРСА

В итоге изучения дисциплины студент должен

Знать: - основы электрических измерений и особенности источников вторичного электропитания;

- этапы развития электроники;
- элементную базу современных электронных устройств;
- основу цифровой и аналоговой электроники;
- параметры и характеристики электронных схем;
- основные базовые элементы аналоговых устройств;
- основные базовые элементы цифровых устройств;

Уметь: - изображать основные базовые элементы аналоговых и цифровых устройств, объяснять принцип их работы и сравнивать их характеристики и параметры;

Иметь навыки: - экспериментально определять статические характеристики и параметры элементов электронных устройств;
- пользования современными пакетами прикладных программ расчета электронных схем на ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ КУРСА

1. Введение в курс.

Вопросы, подлежащие изучению
Смысл терминов «Электротехника» и «Электроника»;
Аналоговая и цифровая электроника;
Технико-экономические показатели электронной аппаратуры;
Этапы развития электроники.

По данной дисциплине нет учебной литературы, охватывающей все разделы курса. Частично материал введения в курс можно найти в [1]. Все четыре вопроса будут подробно разобраны на первой лекции во время заезда.

2. Основы электрических измерений

Измерение токов, напряжений;
Ошибки измерений;
Снятие вольтамперных характеристик (ВАХ);

3. Знакомство с источниками вторичного электропитания. Влияние внутреннего сопротивления источника питания на снятие ВАХ.

Разделы 2 и 3 изучаются в лаборатории во время заезда. Частично материал этих вопросов можно найти в [2].

4. Элементная база современных электронных устройств.

- 4.1. Основы физики полупроводников (п.п.);
- 4.2. (р-п) переход и его свойства;
- 4.3. Разновидности пп диодов;
- 4.4. Биполярные транзисторы (БТ);
- 4.5. Полевые транзисторы (ПТ);
- 4.6. Интегральные микросхемы (ИМС).

Пояснения к изучаемым вопросам.

4.1. Основы физики пп изучались в курсе физики, поэтому данный раздел имеет целью лишь напомнить важнейшие понятия и терминологию.

[1. с.19-47], [2. с.12-16].

Вопросы для самопроверки

1. Что такое полупроводник (п.п.)? Какие типы носителей заряда в п.п. вы знаете?
2. Что такое собственная и примесная проводимость п.п.? Основные и неосновные носители заряда? Доноры и акцепторы?
3. Дайте определения понятиям «генерация», «рекомбинация» носителей заряда.
4. Что такое условие «электрической нейтральности» и «термодинамического равновесия»?
5. Как возникают дрейфовый и диффузионный токи в п.п.?
6. Объясните характер температурной зависимости электрической проводимости для чистого и примесных п.п., для металлов.

4.2. Этот раздел является основой для последующего изучения принципов действия большинства п.п. приборов.

[1. с.71-92; 2. с.15-17]

Вопросы для самопроверки

1. Как возникает р-n переход при идеальном контакте двух п.п. с разным типом проводимости?
2. Нарисуйте вольтамперную характеристику р-n перехода, укажите на ней прямую и обратную ветви.
3. Почему обратный ток р-n перехода сильно зависит от температуры?
4. Укажите типы пробоя в р-n переходе. Какой вид пробоя обратим?
5. Какими зарядами в р-n переходе определяется барьерная емкость и как она зависит от напряжения обратного смещения?
6. Что такое диффузионная емкость р-n перехода?
7. Нарисуйте электрическую модель р-n перехода.

4.3. В этом разделе следует обратить внимание на диоды Шоттки

[1. с.93-98; 2. с.17-28]

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличаются ВАХ германиевых, кремниевых диодов и диодов Шоттки?
 2. Какие вы знаете типы п.п. диодов, использующие различные свойства (р-n) перехода?
 3. Перечислите основные особенности диодов Шоттки.
- 4.4. БТ являются одним из основных типов усилительных и переключающих п.п. приборов, широко использующихся как в виде элементов интегральных микросхем, так и в виде самостоятельных компонентов электронной аппаратуры. Поэтому необходимо подробно изучить устройство и основные физические процессы в БТ.

[1. с 102-134; 2 с 28-34]

Вопросы для самопроверки

1. Что такое биполярный транзистор? В каких режимах он может работать?
2. Поясните принцип работы биполярного транзистора в активном режиме. Докажите, что в этом режиме возможно усиление сигналов.
3. Нарисуйте три схемы включения б/п транзистора, укажите их основные особенности.

4. Как отличаются статические вольтамперные характеристики б/п транзистора для схемы включения с общей базой и общим эмиттером?
5. Что такое α и β ? Как они между собой связаны? Как их определить по вольтамперным характеристикам?
6. Чем объяснить ухудшение усилительных свойств б/п транзистора с ростом частоты?
7. Поясните особенности ключевого режима работы б/п транзистора.

Материал этого раздела вошел в задачу №1 контрольной работы.

4.5. При изучении ПТ необходимо обратить внимание на принципиальное отличие их от БТ.

[1, с.134-155, 392-400; 2, с.34-38]

Вопросы для самопроверки

1. Дайте классификацию современных полевых транзисторов.
2. В чем заключаются принципиальные отличия полевых транзисторов от биполярных?
3. Поясните принцип действия полевого транзистора с управляющим р-n переходом и МПД транзисторов с встроенным и индуцированным каналами.
4. Нарисуйте ВАХ всех известных Вам типов ПТ.
5. Изобразите эквивалентные схемы ПТ на низких и высоких частотах.
6. Как определить мало-сигнальные усилительные параметры ПТ по его ВАХ?
7. Сравните по свойствам и применению ПТ и б/т транзисторы.

4.6. ИМС - элементная база современной электроники.

[1. с.6-18; 2. с.42-52]

Вопросы для самопроверки

1. Каковы объективные предпосылки развития микроэлектроники?
2. Сформулируйте особенности ИМС как нового типа электронных приборов.

3. Сравните свойства активных и пассивных элементов полупроводниковых и гибридных ИМС.
 4. Как выполняются диоды, транзисторы, резисторы, конденсаторы в ИМС. Как они между собой изолированы?
 5. Каковы тенденции развития микроэлектроники?
5. Основы аналоговой электроники.
- 5.1. Примеры аналоговых устройств. Их основные параметры и характеристики.
 - 5.2. Обратная связь в аналоговых устройствах.
 - 5.3. Операционный усилитель (ОУ).

Пояснения к изучаемым вопросам.

5.1 Эти общие вопросы аналоговой электроники частично описаны в [1. с.289-290].

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение основных параметров и характеристик аналоговых устройств.
2. Что такое частотные и переходные характеристики?
3. Что такое амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и частотные искажения?
4. Чем вызваны нелинейные искажения?
5. По какой характеристике рассчитывают динамический диапазон? Знание основ теории обратной связи важно для понимания работы аналоговых устройств и для их построения на современной элементной базе.

[2. с 118-122]

Вопросы для самопроверки

1. Дайте определение понятиям: обратная связь (ОС), положительная ОС (ПОС), отрицательная ОС (ООС).
 2. Где используется ПОС, а где ООС?
 3. Как влияет ООС на параметры и характеристики усилителей?
 4. Чем опасна паразитная ОС?
- ОУ – это основа современной аналоговой электроники, поэтому изучение этого вопроса следует уделить особое внимание.

[1. с.400-412, 2. с.122-139]

Материал этого раздела входит в задачу №2 контрольной работы

Вопросы для самопроверки

1. К какому классу усилителей (по виду АЧХ) относятся ОУ? Нарисуйте АЧХ ОУ.
 2. Дайте определение ОУ. Какие каскады входят в состав ОУ?
 3. Нарисуйте электрическую схему дифференциального усилительного каскада, поясните принцип его работы.
 4. Почему дифкаскад не усиливает синфазное напряжение?
 5. Что такое «дрейф нуля» и какие меры принимают для его уменьшения?
 6. Покажите, почему в ОУ с ООС коэффициент усиления определяется только параметрами цепи ООС.
 7. Нарисуйте две схемы включения (инвертирующую и неинвертирующую) ОУ.
 8. Приведите примеры применения ОУ.
6. Основы цифровой электроники.
- 6.1. Параметры и характеристики цифровых схем.
 - 6.2. Базовые элементы цифровых схем. Электронные ключи.
 - 6.3. Логические элементы современных ИМС.
 - 6.4. Триггер – как элемент памяти. Понятие о микропроцессорах.

Пояснения к изучаемым вопросам.

Развитие цифровой электроники связано с улучшением параметров цифровых схем, главный из которых – средняя работа переключения $p \cdot t$ (фактор качества цифровых схем). Следует хорошо знать параметры с тем, чтобы в дальнейшем сравнивать по ним различные схемотехники.

[1, с 370-372]

Вопросы для самопроверки

1. Почему среднюю работу переключения называют фактором качества цифровых схем?
2. Перечислите и дайте определения основным 7 параметрам цифровых схем.

3. Что такое передаточная характеристика? Какие параметры по ней можно определить?
4. Что такое нагрузочная способность и от чего она зависит?

Электронные ключи – основа цифровой схемотехники, поэтому изучению этого вопроса следует уделить особое внимание.

[1, с.244-279; 2. с.178-185]

Вопросы для самопроверки

1. Что такое электронный ключ? Назовите основные требования, предъявляемые к ключам.
2. Как развивалась схемотехника электронных ключей?
3. Поясните процесс переключения транзисторного ключа. Как его ускорить?
4. Нарисуйте и объясните работу пМДП и кМДП ключей.
5. Что такое «токовый переключатель»?
6. Как достигается уменьшение средней работы переключения $p \cdot t$ в современных цифровых ИМС? Какие типы ключей отличаются наилучшим фактором качества?

Логические элементы строятся на основе электронных ключей, на биполярных и МДП-структурах. Их параметры определяются параметрами ключей.

[2. с.185-191; 1. с.348-369]

Материал этого раздела входит в задачу №3 контрольной работы.

Вопросы для самопроверки

1. Перечислите известные Вам логические элементы на биполярных структурах и на МДП.
2. Какая логика самая быстродействующая?
3. Начертите двухвходовые базовые элементы логики на биполярных структурах (ТТЛ, ТТЛШ, ЭСЛ) и поясните принцип их работы.
4. Начертите логические схемы на 2 входа И-НЕ и ИЛИ-НЕ на МДП-структуре.
5. Начертите логические схемы на 2 входа И-НЕ и ИЛИ-НЕ на кМДП-структуре. Сравните их по параметрам с другими логическими схемами.

Триггеры строят на основе логических элементов. Их параметры определяются параметрами соответствующих логических элементов.

[1. с.279-285, 373-385; 2. с.218-224]

Вопросы для самопроверки

1. Сколько устойчивых состояний имеет триггер?
2. Нарисуйте графическое обозначение RS – триггера и поясните принцип его работы.
3. Нарисуйте графическое обозначение JK – триггера и поясните принцип его работы.
4. Что такое T – триггер? D – триггер?
5. Где используются триггеры?
6. Что такое микропроцессоры?

СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИЙ

(во время лабораторно – экзаменационной сессии)

- Лекция 1. (2 ч.) Введение в курс.
- Лекция 2. (2 ч.) Основы физики полупроводников. p-n переход, его свойства, пп. диоды.
- Лекция 3. (2 ч.) Биполярные транзисторы. Устройство, режимы работы, схемы включения, ВАХ.
- Лекция 4. (2 ч.) Биполярные транзисторы. Параметры и модели, частотные и импульсные свойства.
- Лекция 5. (2 ч.) Полевые транзисторы. Классификация. Принцип работы. Статические ВАХ. Параметры и модели. Сравнение с БТ.
- Лекция 6. (2 ч.) Усилители. Классификация по виду АЧХ. Основные параметры и характеристики. Операционный усилитель.
- Лекция 7. (2 ч.) Основные параметры цифровых схем. Схемотехника электронных ключей и логических элементов.

СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. Знакомство с вторичными источниками питания и основами измерений (1 ч.)
2. Снятие ВАХ пп. диодов (1 ч.)
3. Компьютерное моделирование МДП-транзистора (1 ч.)
4. Исследование влияния минимального топологического размера на среднюю работу переключения цифровых ИМС (1 ч.)

**КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К
ВЫПОЛНЕНИЮ**

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Контрольные задания охватывают наиболее важные вопросы курса. Задачи носят учебный характер и составлены так, что способствуют углублению и закреплению теоретических знаний.

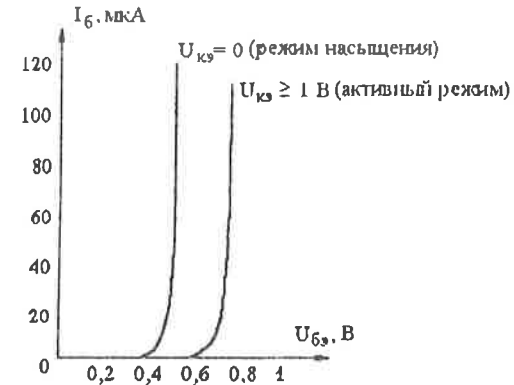
Контрольная работа содержит 3 задачи.

Задача №1 анализирует режим усиления и ключевой режим работы БТ.

Задача №2 знакомит с основными схемами включения ОУ.

Задача №3 посвящена логическим схемам на пМДП и кМДП структурах.

Задача №1

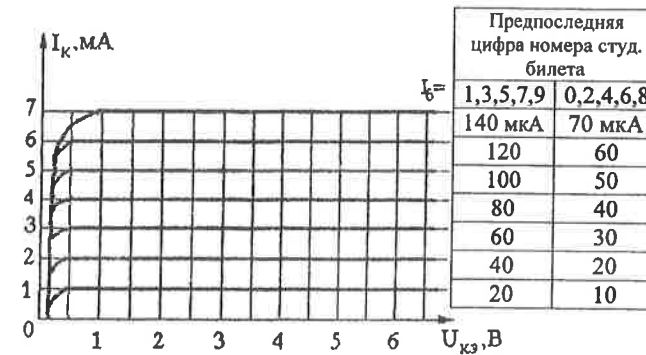


Координаты некоторых точек (для точного перечерчивания)

Uбэ, В	Iб, мкА
до 0,5	≈ 0
0,6	2
0,65	10
0,7	40
0,75	100

Рис. 1. Входная ВАХ кремниевого маломощного транзистора, включенного с ОЭ для ключевого режима:

г) определить остаточное напряжение на открытом транзисторе $U_{ост}$, выходной ток $I_{к нас}$, сопротивление транзистора в состоянии «включено»



Предпоследняя цифра номера студ. билета	
1,3,5,7,9	0,2,4,6,8
140 мкА	70 мкА
120	60
100	50
80	40
60	30
40	20
20	10

Рис. 2. Семейство выходных ВАХ кремниевого маломощного транзистора, включенного с ОЭ

По заданным статическим вольтамперным характеристикам (ВАХ) биполярного транзистора (рис. 1 и 2) и исходным данным, приведенным в табл. 1, для схемы включения маломощного кремниевого транзистора с общим эмиттером (ОЭ) (рис. 3) выполнить следующие графоаналитические расчеты:

Для режима усиления:

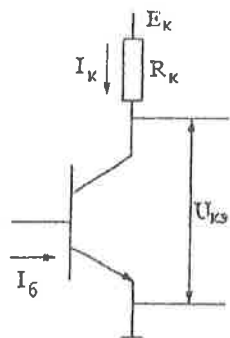


Рис.3. Схема включения ОЭ

а) определить значения постоянных токов и напряжений в рабочей точке – тока базы I_b , напряжения база-эмиттер $U_{бэ}$, тока коллектора I_k , выходного напряжения $U_{кэ}$; определить мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора P_k и на резисторе P_{R_k} ;

б) построить зависимость тока коллектора I_k от тока базы I_b и определить по ней, при каких значениях тока коллектора и тока базы транзистор входит в режим насыщения; отметить на построенном графике участки активного режима и

режима насыщения; определить по графику коэффициент передачи тока базы $h_{21э}$ (или β);

в) построить на выходных ВАХ временные диаграммы синусоидальных составляющих токов и напряжений, соответствующие максимальной амплитуде переменной составляющей напряжения коллектор-эмиттер, еще не приводящей к заметным искажениям (и ограничению), и рассчитать коэффициенты усиления переменного сигнала по напряжению K_u , по мощности K_p , входное и выходное сопротивление $R_{вх}$ и $R_{вых}$, полезную мощность в нагрузке $P_{R~}$;

$R_{вкл}$, мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора в состоянии «включено» P_k вкл, ток базы, необходимый для включения транзистора I_b вкл, мощность, необходимую для включения транзистора $P_{вх}$ вкл.

Таблица 1

Номер студенческого билета		I_b , мкА	E_k , В	R_k , кОм
Предпоследняя цифра	Последняя цифра			
Нечетная	1	40	2	0,50
	2	30	2,5	0,62
	3	50	3	0,75
	4	30	3,5	0,87
	5	40	4	1,00
	6	50	4,5	1,12
	7	60	5	1,25
	8	50	5,5	1,37
	9	70	6	1,50
	0	60	6,5	1,62
Четная или 0	1	30	5	1,00
	2	40	5,5	1,10
	3	20	5	1,00
	4	35	5,5	1,10
	5	25	5	1,00
	6	30	4,5	0,90
	7	35	5	1,00
	8	30	5,5	1,10
	9	40	6	1,20
	0	20	6,5	1,30

Методические указания по решению задачи №1

Биполярный транзистор состоит из двух взаимодействующих p-n переходов – эмиттерного и коллекторного, к которым можно приложить или прямое, или обратное смещение. Таких вариантов 4, отсюда 4 режима работы транзистора:

- 1) режим насыщения (оба перехода включены прямо и открыты);
- 2) режим отсечки (оба перехода включены обратно и заперты).

Режимы 1) и 2) называют ключевым, т.к. транзистор работает как ключ – или открыт (в режиме насыщения) и через него идет большой ток, или заперт (в отсечке) и ток через него не идет.

3) активный режим (эмиттерный переход включен прямо, а коллекторный - обратно).

В этом режиме транзистор способен усиливать сигналы.

4) инверсный режим (эмиттерный переход включен обратно, а коллекторный - прямо) - используют редко.

Пример решения задачи № 1

Дано: $E_k = 6 \text{ В}$; $R_k = 2 \text{ кОм}$; $I_b = 45 \text{ мкА}$.

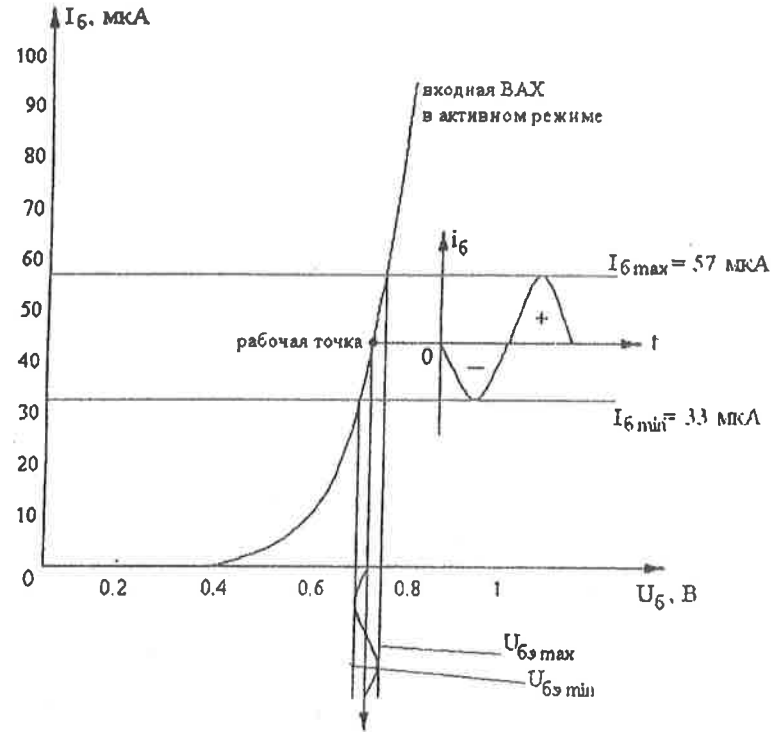


Рис. 4. Графические построения на входной ВАХ

Расчет по п. а):

Перечертим входные и выходные ВАХ в тетрадь (рис. 4,5). На входной ВАХ, соответствующей активному режиму работы транзистора, отметим рабочую точку по заданному значению тока базы. Координаты рабочей точки $U_{бэ} = 0.7 \text{ В}$, $I_b = 45 \text{ мкА}$. Это и есть значения постоянного напряжения база - эмиттер и постоянного тока базы.

Перейдем к определению постоянного тока коллектора I_k и постоянного напряжения коллектор-эмиттер $U_{кэ}$. Для этого воспользуемся семейством выходных ВАХ. Прежде всего, заметим, что на исходном семействе ВАХ (сплошные линии) есть графики для значений тока базы $I_b = 10, 20, 30, 40, 50 \text{ мкА}$ и т.д., но нет именно того графика, который нужен нам, т.е. для $I_b = 45 \text{ мкА}$. Поэтому сначала построим нужную нам характеристику (штриховая линия) для $I_b = 45 \text{ мкА}$.

Выходная цепь является замкнутым контуром из источника питания E_k , резистора R_k и участка коллектор-эмиттер транзистора. Поэтому, согласно II закону Кирхгофа (сумма ЭДС равна сумме падений напряжений), можно записать уравнение:

$$E_k = I_k R_k + U_{кэ} \text{ или } I_k = (E_k - U_{кэ}) / R_k.$$

Его называют нагрузочной линией и строят на выходных ВАХ по двум точкам: 1) точке пересечения с осью X, когда $I_k = 0$, тогда $U_{кэ} = E_k$ и 2) точке пересечения с осью Y, когда $U_{кэ} = 0$ и $I_k = E_k / R_k = 6 / 2 = 3 \text{ мА}$. Рабочая точка находится на пересечении линии нагрузки и графика ВАХ для $I_b = 45 \text{ мкА}$. Ее координаты $I_k = 2.25 \text{ мА}$, $U_{кэ} = 1.5 \text{ В}$.

Вычисляем мощность, рассеиваемую на коллекторе транзистора:

$$P_k = I_k U_{кэ} = 2.25 \cdot 1.5 \approx 3.38 \text{ мВт}.$$

Мощность, рассеиваемая на резисторе:

$$P_R = I_k^2 R_k = (2.25 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2 \cdot 10^3 \approx 10.12 \text{ мВт}.$$

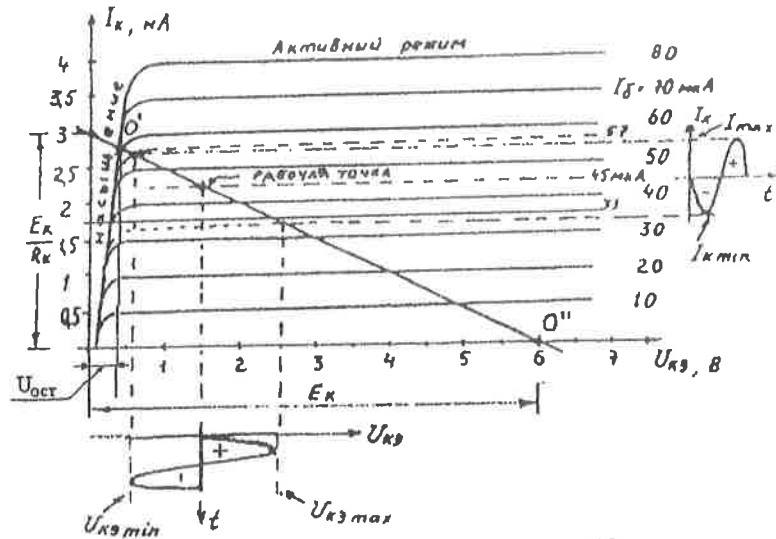


Рис.5. Графические построения на семействе выходных ВАХ

Расчет по п. б)

Для построения зависимости тока коллектора I_k от тока базы I_b воспользуемся уже имеющимся семейством выходных ВАХ с проведенной на нем нагрузочной линией (см. рис. 5). Очевидно, что, например, задав $I_b = 10$ мкА, нужно для определения тока коллектора I_k искать точку пересечения нагрузочной линии с ВАХ для $I_b = 10$ мкА. Находим соответствующее значение $I_k \approx 0,5$ мА (см. рис. 5) в этой точке пересечения. Увеличивая ток базы I_b до 20, 30, 40 мкА и т.д., наблюдаем, как перемещается рабочая точка по нагрузочной прямой, и записываем соответствующие значения тока коллектора I_k в таблицу 2.

Таблица 2

$I_b, \text{мкА}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
$I_k, \text{мА}$	≈ 0	0,5	1	1,5	2	2,5	2,8	2,8	2,8

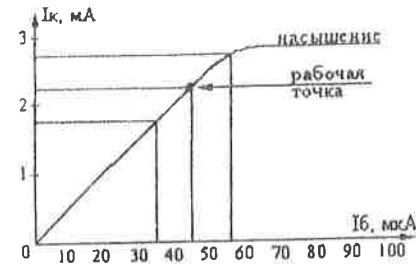


Рис.6. Зависимость I_k от I_b

По полученной таблице строим график (рис.6). По графику видим, что при изменении тока базы от 0 до примерно 51-55 мкА имеет место практически прямо пропорциональная

$$H_{21} = \frac{I_k}{I_b} = \frac{10^{-3}}{20 \cdot 10^{-6}} = 50$$

зависимость тока коллектора от тока базы, т.е. транзистор находится в активном режиме.

Коэффициент передачи тока для этого режима одинаков в любой точке. Начиная со значений тока базы 60 мкА, ток коллектора достигает величины 2,8 мА и перестает возрастать, несмотря на продолжающийся рост тока базы, так как рабочая точка (см. рис. 5) при $I_b > 60$ мкА попадает на тот участок семейства выходных ВАХ, где графики для различных токов базы практически сливаются в одну линию (эта линия соответствует режиму насыщения на семействе выходных ВАХ).

Расчет по п. в)

Для построения временных диаграмм тока I_k и напряжения $U_{кэ}$ на семействе выходных ВАХ (рис.5) сначала находим, в каких пределах может меняться ток коллектора I_k при условии, что транзистор не входит ни в режим насыщения, ни в режим отсечки. Исходное значение тока коллектора I_k в рабочей точке равно 2,25 мА. Отметим эту точку на рис. 6, там же определим точку, которая находится на границе активного режима и режима насыщения. В нашем случае это точка с координатами $I_k \text{ max} = 2,7$ мА, $I_b \text{ max} = 57$ мкА (см. штрихованную линию на рис.5).

Следовательно, если переменная составляющая тока коллектора должна иметь синусоидальную форму, то приращение тока коллектора относительно его значения в рабочей точке должно составлять не более $2,7 - 2,25 = 0,45$ мА. Так как положительная и отрицательная полуволны синусоиды должны иметь одинаковую амплитуду, то минимальное значение тока коллектора $I_k \text{ min}$ должно быть равно $2,25 - 0,45 = 1,8$ мА, при этом $I_b \text{ min} = 33$ мкА.

По значениям $I_k \max$ и $I_k \min$ находим на графике (рис. 5) соответствующие значения $U_{k3} \min$, $U_{k3} \max$ и изображаем временные диаграммы тока коллектора и напряжения коллектор-эмиттер. Отмечаем, что уменьшению тока I_k соответствует увеличение напряжения U_{k3} . Амплитуда положительной полуволны на временной диаграмме напряжения U_{k3} оказалась несколько больше, чем отрицательной полуволны. Это является следствием некоторой нелинейности ВАХ.

Откладываем значения $I_b \min$ и $I_b \max$ на входной ВАХ (см. рис 4), строим временные диаграммы тока базы и напряжения база - эмиттер (синусоидальные кривые в границах $I_b \min - I_b \max$ и $U_{b3} \min - U_{b3} \max$). Отметим, что фазы i_b и i_k , U_{b3} - совпадают, а фазы U_{b3} и U_{k3} - сдвинуты на 180° . Периоды всех колебаний должны быть одинаковыми. Определим амплитуды переменных сигналов.

Амплитуда входного напряжения:

$$U_{m \text{ бз}} = (U_{b3} \max - U_{b3} \min)/2 = (0,72 - 0,68)/2 = 0,02 \text{ В.}$$

Амплитуда входного тока:

$$I_{m \text{ б}} = (I_b \max - I_b \min)/2 = (57 - 33)/2 = 12 \text{ мкА.}$$

Амплитуда выходного напряжения:

$$U_{m \text{ кз}} = (U_{k3} \max - U_{k3} \min)/2 = (2,5 - 0,5)/2 = 1 \text{ В.}$$

Амплитуда выходного тока:

$$I_{m \text{ к}} = (I_k \max - I_k \min)/2 = (2,7 - 1,8)/2 = 0,45 \text{ мА.}$$

Рассчитаем коэффициенты усиления переменного сигнала:

$$\text{По напряжению: } K_U = U_{m \text{ кз}} / U_{m \text{ бз}} = 1/0,02 = 50.$$

$$\text{По току: } K_I = I_{m \text{ к}} / I_{m \text{ б}} = 0,45/0,012 = 37,5.$$

$$\text{По мощности: } K_P = K_U \cdot K_I = 50 \cdot 37,5 = 1875.$$

Входное сопротивление

$$R_{вх} = \frac{U_{m \text{ бз}}}{I_{m \text{ б}}} = \frac{0,02}{12 \cdot 10^{-6}} = 1,7 \text{ кОм.}$$

Выходное сопротивление

$$R_{вых} = \frac{U_{m \text{ кз}}}{I_{m \text{ к}}} = \frac{1}{0,45 \cdot 10^{-3}} = 2,2 \text{ кОм.}$$

Полезная мощность в нагрузке

$$P_R = \frac{I_{m \text{ к}}^2 \cdot R_L}{2} = \frac{(0,45 \cdot 10^{-3})^2}{2} \cdot 2 \cdot 10 = 0,2 \text{ мВт.}$$

Отметим, что полученные значения очень неточны, т.к. величины $U_{b3} \max$ и $U_{b3} \min$ довольно близки друг к другу, вследствие чего на их значения сильно влияют погрешности построений.

Расчет по п. 2)

Ключевой режим работы транзистора можно проанализировать с помощью ВАХ (рис. 5). Однако рабочая точка на выходных ВАХ будет находиться либо в режиме отсечки (транзистор выключен), либо в режиме насыщения (транзистор включен) – точка О (точка пересечения линии нагрузки и линии насыщения). Ее координаты $I_k \text{ нас}$ и $U_{ост}$ находят непосредственно по выходным ВАХ.

$$I_k \text{ нас} = 2,8 \text{ мА; } U_{ост} = 0,3 \text{ В.}$$

Сопротивление транзистора в состоянии «включено»

$$R_{вкл} = \frac{0,3}{2,8 \cdot 10^{-3}} = 107 \text{ Ом.}$$

Мощность, рассеиваемая на коллекторе транзистора в состоянии «включено»,

$$P_{к \text{ вкл}} = 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 = 0,84 \text{ мВт.}$$

Ток базы, необходимый для включения транзистора $I_b \text{ вкл}$, согласно рис. 5, должен быть больше $I_b \text{ вкл} \min = 60 \text{ мкА}$. Для получения малого времени включения транзистора рекомендуется подавать входной ток в несколько раз больший, чем требуется для начала режима насыщения:

$$I_b \text{ вкл} = K_{нас} \cdot I_b \text{ вкл} \min,$$

где $K_{нас}$ – коэффициент насыщения, $K_{нас} = 3 \div 5$ при $K_{нас} = 4$,

$$I_b \text{ вкл} = 4 \cdot 60 = 240 \text{ мкА.}$$

Мощность, необходимая для отпирания ключа,

$$P_{вх} = I_b \text{ вкл} \cdot U_{b3} \text{ вкл},$$

где $U_{b3} \text{ вкл}$ находят по входной ВАХ, снятой при $U_{кз} = 0$ (т.е. для режима насыщения).

Согласно рис.1, $U_{b3} \text{ вкл} = 0,5 \text{ В.}$

$$P_{вх} = 240 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 = 0,12 \text{ мВт.}$$

Задача №2

1. Перечертить в тетрадь схему включения идеального операционного усилителя (ОУ), выбранную по рис. 7 в соответствии с последней цифрой номера студенческого билета.
2. Для заданной схемы изобразить временные диаграммы входных сигналов, взятых из таблицы 3.
3. Показать выходной сигнал от каждого входного с учетом соотношения фаз, отдельно выделив результирующий выходной сигнал.
Масштаб выбрать условный без учета коэффициента усилителя (ОУ).

Таблица 3

Предпоследняя цифра номера студенческого билета	Напряжение входного сигнала			Фаза входного сигнала		
	U1	U2	U3	Фаза U1	Фаза U2	Фаза U3
0	10	5	15	-	+	+
1	5	10	10	+	-	+
2	15	10	5	+	-	+
3	5	10	10	+	+	-
4	5	10	15	-	+	-
5	10	5	10	+	-	-
6	10	15	5	-	+	+
7	5	15	10	-	+	-
8	15	5	10	+	-	-
9	10	10	15	+	-	+

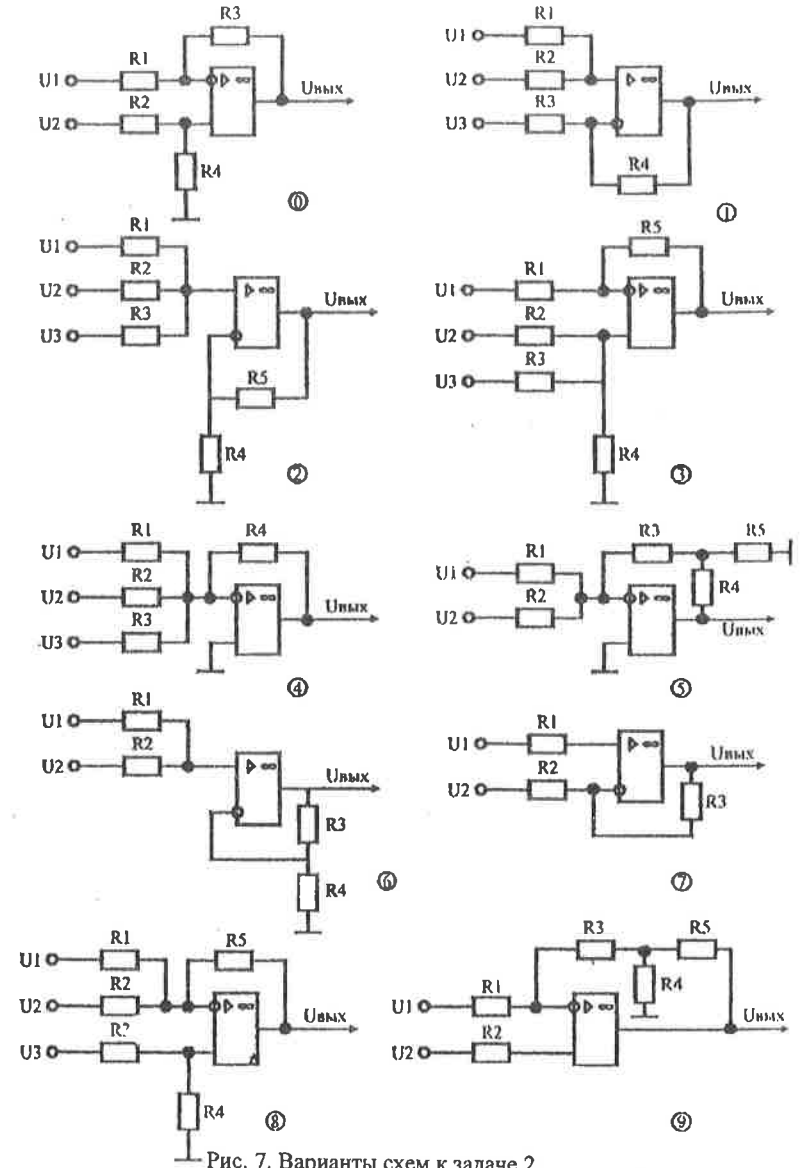


Рис. 7. Варианты схем к задаче 2.

Пример решения задачи №2

Пусть задана схема включения ОУ, показанная на рис. 8. В этой схеме сигналы U_1 и U_2 подаются на инвертирующий вход, а сигнал U_3 – на неинвертирующий. Это означает, что фаза выходного сигнала от воздействия U_3 будет совпадать с фазой U_3 , а фазы выходных сигналов от воздействия U_1 и U_2 будут им противоположны. Будем считать, что коэффициенты усиления ОУ по каждому из входов одинаковы. Предположим, что согласно табл. 3.

U_1	U_2	U_3	фаза U_1	фаза U_2	фаза U_3
5	10	15	+	-	-

На рис. 9 изображены временные диаграммы входных и выходных сигналов. В условном масштабе при равном коэффициенте усиления по каждому из входов соотношение амплитуд выходных сигналов сохраняется. Результирующий выходной сигнал представляет сумму выходных сигналов от воздействия каждого входного с учетом фазовых соотношений. В данном случае он совпал с откликом на сигнал U_1 .

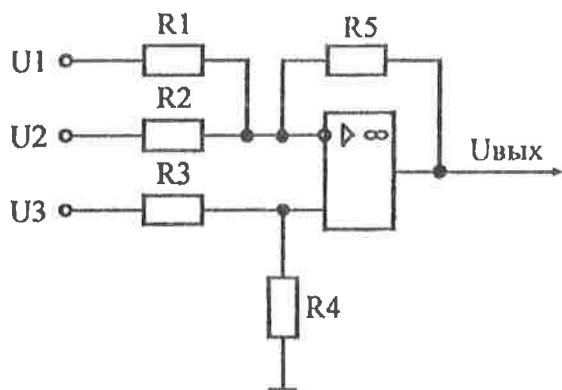


Рис. 8. Схема включения ОУ к примеру решения задачи 2

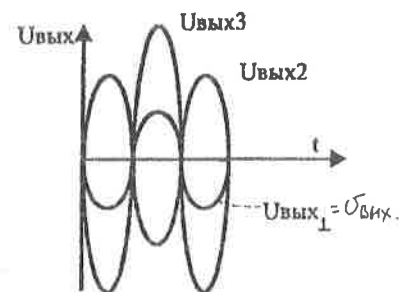
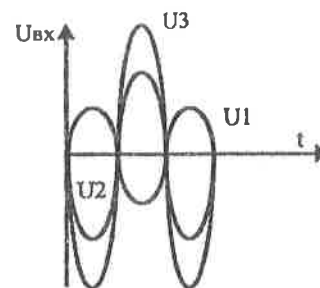


Рис. 9. Временные диаграммы входных и выходных сигналов к примеру решения задачи 2

Задача № 3

1. Нарисовать логическую схему на 2 входа, реализующую заданную в табл. 4 логическую функцию. Студенты, у которых последняя цифра номера студенческого билета четная, рисуют схему на ПМДП ключах, нечетная – на КМДП ключах.
2. Пояснить, как работает схема при заданной в таблице 4 комбинации входных сигналов.

Таблица 4

		Предпоследняя цифра номера студенческого билета									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Логическая функция		И-НЕ	ИЛИ-НЕ	ИЛИ	И	И-НЕ	ИЛИ-НЕ	И	ИЛИ	И-НЕ	ИЛИ-НЕ
Входной сигнал	X1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
	X2	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1

Методические указания к решению задачи № 3

На рис. 10 изображен пМДП ключ и стоко – затворная ВАХ пМДП транзистора с индуцированным каналом.

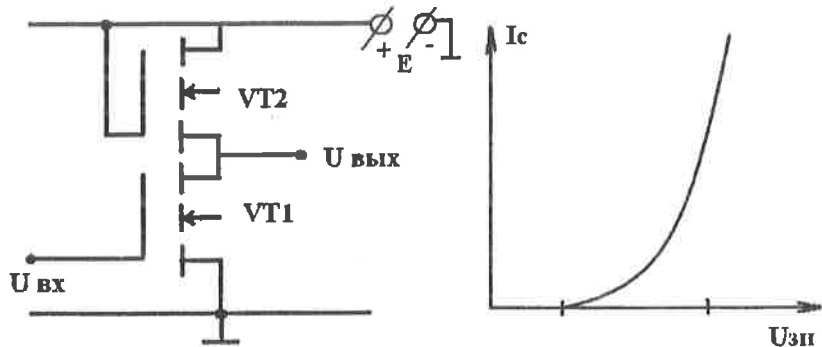


Рис. 10. Схема пМДП ключа и ВАХ пМДП транзистора

VT1 – это активный транзистор, который переключается (открыт - закрыт), VT2 – играет роль нагрузочного сопротивления R_n . Т.к. затвор VT2 подключен к шине питания, то он всегда открыт. VT1 открыт, если на его входе логическая единица (как правило, это напряжение источника питания $E \geq 2 U_{пор}$) и закрыт, если на входе сигнала нет (логический нуль). пМДП ключ является инвертором, т.е. выполняет логическую функцию НЕ.

Для построения более сложных логических функций активные транзисторы включают параллельно (для получения функции ИЛИ –

НЕ) или последовательно (для получения функции И – НЕ). Нагрузочный же транзистор – один на всех, независимо от количества входов.

В качестве примера приведем логическую схему ИЛИ – НЕ на 3 входа (рис. 11).

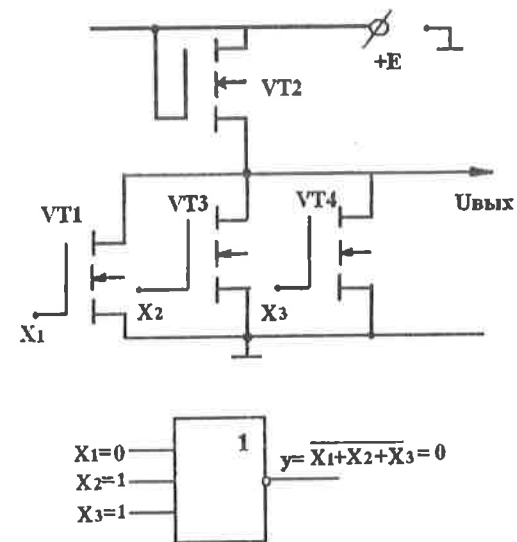


Рис. 11. Логическая схема ИЛИ – НЕ на 3 входа

Пусть сигналы на входе имеют значения, указанные на рис. 11. Тогда VT1 – закрыт, VT3 и VT4 - открыты (VT2 открыт всегда) и $U_{вых}=0$. Если задана логическая функция ИЛИ, то следует к выходу схемы рис. 11 подключить инвертор (т.е. схему рис. 10).

На рис. 12 изображен кМДП – ключ и стоко – затворные ВАХ для МДП транзисторов с индуцированными каналами п и р типа.

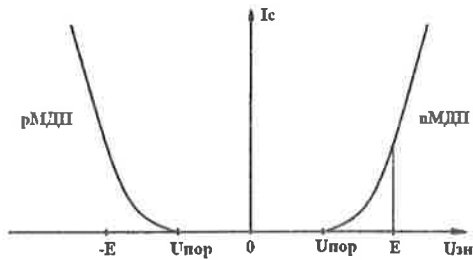
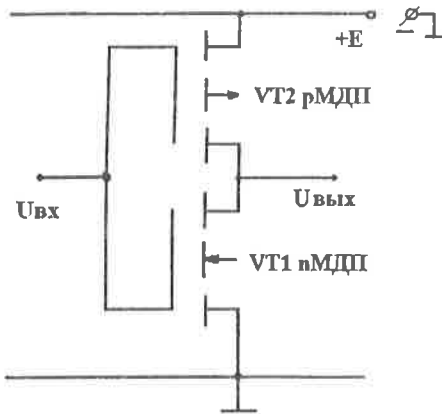


Рис. 12. Схема кМДП ключа и ВАХ пМДП и рМДП транзисторов.

В схеме рис. 12 $U_{зи\text{ пМДП}} = U_{вх}$
 $U_{зи\text{ рМДП}} = U_{вх} - E$ (1)

Поэтому, если на входе логическая единица ($U_{вх} \approx E$), то пМДП – открыт, а рМДП – закрыт, т.к. согласно (1) у него $U_{зи} = 0$. Если же на входе сигнала нет (логический ноль), то пМДП – закрыт, а рМДП – открыт. Поэтому в стационарном режиме ток через схему рис. 12 не протекает ни при «0», ни при «1» на входе!
 Это самый экономичный ключ, он потребляет минимум энергии (только в процессе переключения на перезаряд паразитных емкостей).

Для построения логических функций ИЛИ – НЕ транзисторы нижнего этапа (пМДП) включают параллельно, а их пары – транзисторы верхнего этапа (рМДП) – последовательно.

Для построения функций И – НЕ – наоборот: п – канальные транзисторы включают последовательно, а р – канальные – параллельно.

В качестве примера приведем логическую схему ИЛИ на 3 входа (рис. 13)

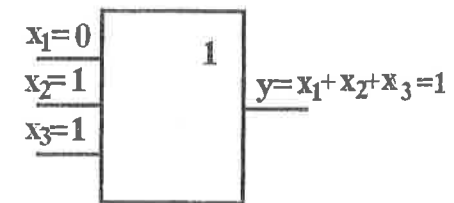
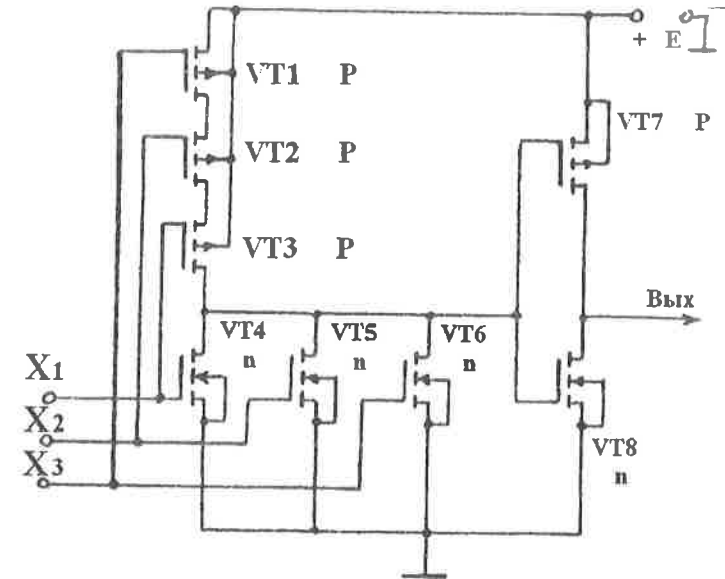


Рис. 13. Логический элемент ИЛИ на кМДП – транзисторах

Пусть сигналы на входе имеют значения, указанные на рис. 13. Тогда VT4 – закрыт, а его пара VT3 – открыт; VT5 – открыт, а его пара VT2 – закрыт, VT6 – открыт, а его пара VT1 – закрыт. VT8 – закрыт (на его входе «0»), а VT7 – открыт. $U_{\text{вых}} = «1»$.