

Министерство образования Российской Федерации

Владивостокский государственный университет  
экономики и сервиса

---

**Ю.А. ЛЕВАШОВ**

# **РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Учебно-методическое пособие

Владивосток  
Издательство ВГУЭС  
2003

ББК 32.972

Л 34

Рецензент: Ю.В. Малышенко, д-р техн. наук, профессор, начальник каф. организации таможенного контроля ВФ РТА;  
Н.Н. Номоконова, канд. техн. наук, доцент каф. электроники ВГУЭС

**Левашов Ю.А.**

Л 34      **РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ: Учебно-методическое пособие.** – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2003. – 72 с.

В пособии приводится схемотехника и принципы работы базовых логических элементов серий ТТЛ и ЭСЛ, преобразователей уровней логических сигналов; предлагается методика расчета статических и динамических параметров базовых логических элементов и преобразователей уровней. Содержит методические указания к выполнению курсовой работы по дисциплине «Расчет электронных устройств».

Для студентов специальности 220100 «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

ББК 32.972

© Издательство Владивостокского государственного университета экономики и сервиса, 2003

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Увеличение степени интеграции интегральных схем определяет новые подходы к проектированию БИС, как правило, из библиотек логических и других функциональных узлов с использованием систем автоматизированного проектирования электронных устройств.

Но актуальность изучения студентами принципов работы «элементарных строительных кирпичиков» аппаратурных средств компьютерной техники не снижается. Во-первых, существует необходимость ясного понимания функционирования электронных устройств, их внутренних и внешних параметров. Во-вторых, в практической деятельности инженеров часто возникает необходимость сопряжения датчиков и исполнительных устройств с серийными логическими элементами, т.е. преобразования уровней логических сигналов.

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов специальности 220100 «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети» и может быть использовано при выполнении курсовой работы по дисциплине «Расчет электронных устройств».

При написании учебного пособия автор стремился к такому методическому изложению материала, которое бы существенно способствовало интенсификации выполнения курсовой работы, не ограничивая в то же время студентов в самостоятельном выборе тем работ и характеристик электронных устройств.

# 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

## 1.1. Цели и задачи курсового проектирования

Выполнение курсовой работы является завершающей стадией изучения дисциплины «Расчет электронных устройств» и имеет своей целью:

а) систематизацию, закрепление и расширение теоретических знаний студентов по дисциплине;

б) углубленное изучение одного из направлений электронной техники;

в) развитие навыков решения инженерных задач;

г) развитие навыков и умений использовать техническую литературу, стандарты и руководящие технические материалы.

Курсовая работа должна решать следующие задачи:

а) изучение принципов работы и назначение элементов принципиальных схем электронных устройств;

б) расчет функциональных узлов электронных устройств;

в) расчет статических и динамических параметров электронных устройств;

г) оформление документации на разрабатываемое изделие.

## 1.2. Задание на курсовую работу

Тематика курсовой работы определяется углубленным изучением одного из разделов дисциплины. В качестве объектов расчета предлагаются:

1. Базовые элементы ТТЛ, ЭСЛ и КМДП логики [1, 2].

2. Устройства сопряжения функциональных узлов компьютерной техники [2, 3, 4, 5, 6, 7].

3. Функциональные устройства аналоговой электроники: усилители, активные RC-фильтры, генераторы электрических колебаний и т. д. [7, 8, 9].

4. Источники вторичного электропитания электронных устройств [10, 11].

Тема курсовой работы может быть предложена студентом самостоятельно в соответствии с приведенной выше тематикой или предлагается студенту в начале семестра преподавателем – руководителем работы. Задание на выполнение курсовой работы оформляется на типовом бланке (Приложение 1), согласовывается с преподавателем – руководителем работы и утверждается заведующим кафедрой.

Задание на курсовую работу должно содержать:

- 1) тему работы;
- 2) исходные данные к работе;
- 3) предполагаемое содержание пояснительной записки (название разделов);
- 4) перечень графического материала с указанием обязательных рисунков и чертежей;
- 5) рекомендуемую основную литературу и нормативные материалы.

После окончания работы задание подшивается к пояснительной записке (за титульным листом). В число листов пояснительной записки задание на выполнение курсовой работы не включается.

### 1.3. Указания к выполнению пояснительной записки и графических материалов

Пояснительная записка к курсовой работе набирается на компьютере или пишется от руки на листах формата А4 и должна иметь объем 15–20 листов.

Рекомендуется придерживаться следующей последовательности материала пояснительной записки:

1. Титульный лист (Приложение 2).
2. Задание на курсовую работу.
3. Содержание.
4. Введение.
5. Описание принципиальной схемы и назначение элементов разрабатываемого устройства.
6. Расчет функциональных узлов.
7. Расчет статических параметров.
8. Расчет динамических параметров.
9. Заключение.
10. Список использованных источников.
11. Приложения.

**Введение.** В этом разделе дается определение, назначение и область применения разрабатываемого устройства. Излагается история создания устройств данного назначения, формулируются задачи, стоящие перед разработчиком, и намечаются пути их решения.

**Описание принципиальной схемы и назначение элементов.** Целью настоящего раздела является составление или выбор из литературных источников электрической принципиальной схемы разрабатываемого устройства, выбор элементной базы для его реализации и

описание работы устройства по его принципиальной схеме, которое должно включать:

- а) перечисление и назначение функциональных узлов, входящих в устройство;
- б) назначение элементов, на которых реализованы функциональные узлы;
- в) описание входных и выходных сигналов с областями их допустимых значений;
- г) формулы или таблицы, связывающие входные и выходные параметры;
- д) прохождение сигнала от входа до выхода устройства и изменения состояния элементов схемы при изменении уровней входных сигналов.

**Расчет функциональных узлов.** Этот раздел может быть совмещен с разделом «Расчет статических параметров». В разделе определяется режим работы усилительных элементов по постоянному току, рассчитываются значения сопротивлений резисторов, обеспечивающие требуемые напряжения и токи покоя усилительных элементов для аналоговых сигналов и состояние отсечки или насыщения (включения) активных элементов для цифровых сигналов.

Очевидно, что полный электрический расчет всех функциональных узлов из-за ограниченности объема курсовой работы можно выполнить не всегда. В этом случае в задании оговариваются рассчитываемые функциональные узлы.

Электрические принципиальные схемы не рассчитываемых функциональных узлов только выбираются (заимствуются из аналогичных устройств) с обязательной ссылкой на источник, в котором должны быть приведены режимы работы схемы по постоянному току и номинальные значения используемых схемных элементов (резисторов, конденсаторов и т.п.). Описание работы этих функциональных узлов должно быть приведено в предыдущем разделе.

**Расчет динамических параметров.** В этом разделе рассчитываются временные и (или) частотные характеристики устройства (длительность задержек, фронтов и спадов цифровых сигналов, ширина полосы пропускания устройства, амплитудные и фазочастотные искажения аналогового сигнала при прохождении через устройство и т.п.).

По результатам этого раздела строятся эпюры переходных процессов и графики амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик.

**Заключение.** В заключении излагаются основные результаты выполненной работы. Основное внимание должно быть уделено сравнительной оценке заданных характеристик с полученными, отмечены

положительные стороны предложенных технических решений и их недостатки. Здесь же предлагаются рекомендации по дальнейшему усовершенствованию электрической схемы с целью улучшения характеристик устройства.

**Список использованных источников.** В этом разделе перечисляются монографии, учебники и учебные пособия, журналы, а также нормативные и технические материалы (ГОСТы, технические условия, технические описания и т.д.), использованные во время работы. Каждому источнику, в соответствии с очередностью в списке, присваивается свой порядковый номер. Порядок расположения источников в перечне – по мере появления ссылок в тексте пояснительной записки. Таким образом, на каждый источник, приведенный в списке, должна быть, как минимум, одна ссылка в тексте пояснительной записки. Все формулы, численные значения параметров сигналов и устройств должны иметь ссылку на источник, откуда они взяты. Ссылка оформляется в виде порядкового номера источника, помещенного в квадратные или косые скобки.

При использовании ряда формул и справочных данных из одного источника допускается в начале расчета привести вводную фразу типа «Расчет преобразователя уровней логического сигнала проводим по методике, приведенной в [4]. В этом случае дальнейшие ссылки на этот источник перед формулами можно опустить.

Без ссылок на источник используются общеизвестные фундаментальные формулы и формулы, выведенные самим студентом.

Для книг в списке использованных источников приводятся следующие данные: 1) автор (авторы) или название (для коллективных изданий); 2) название или редактор (для коллективных изданий); 3) место издания; 4) издательство; 5) год издания.

Для источников, взятых из периодической печати: 1) автор (авторы); 2) название статьи; 3) название журнала; 4) год издания; 5) номер; б) страницы.

При записи ГОСТов приводятся номер и название стандарта. При записи прочей технической документации указываются название и шифр документа.

**Приложения.** Наличие и содержание приложений определяется темой курсовой работы и должно быть оговорено в задании. Как правило, приложения требуются в курсовых работах, имеющих научно-исследовательский характер или предназначенных для внедрения в учебный процесс. В приложения выносятся дополнительные текстовые и графические материалы (спецификации, листинги разработанных программ, акты испытаний изготовленных макетов, структурные и принципиальные схемы систем, частью которых является разрабатываемое устройство, и т.п.).

**Указания к выполнению графической части.** Графическая часть курсовых работ может быть оформлена в виде рисунков, расположенных по тексту пояснительной записки или вынесенных в приложения.

Условные графические обозначения элементов принципиальных схем на рисунках должны соответствовать действующим ГОСТам. Примеры условных графических изображений наиболее часто встречающихся элементов приведены в Приложении 3. Каждый рисунок должен иметь порядковый номер и подрисуночную надпись.

Если это оговорено в задании, то часть графических материалов (схемы электрические структурные, функциональные и принципиальные) оформляются в виде чертежей. Оформление чертежей должно соответствовать требованиям ЕСКД. Эти требования приведены в сборниках стандартов или в соответствующей литературе, например [12].

#### 1.4. Выполнение курсовой работы и ее защита

Получив исходные данные, студент оформляет задание на курсовую работу, согласовывает его с преподавателем – руководителем работы и составляет индивидуальный календарный график выполнения курсовой работы. В календарном графике должно быть предусмотрено три этапа выполнения работы с отчетом на 6, 12 и 15 неделях семестра. После утверждения задания и календарного графика студент приступает к непосредственному выполнению курсовой работы.

В процессе выполнения курсовой работы для студентов организуются консультации. Во время консультаций руководитель работы обсуждает со студентами возможные варианты технических решений для реализации разрабатываемого устройства, рекомендует литературу по частным вопросам, проверяет результаты расчетов, на 6 и 12 неделях семестра контролирует выполнение графика работы и заносит результаты в аттестационную ведомость.

Оформленная курсовая работа сдается студентом руководителю на проверку и после исправления ошибок допускается к защите. При защите работы студент в течение 8–10 минут докладывает о поставленной перед ним технической задаче и возможных путях ее реализации, обосновывает выбранное схмотехническое решение, по принципиальной схеме объясняет работу устройства. В конце доклада студент подводит итог своей работы (о полном или неполном выполнении задания с объяснением причин невыполнения). После ответов на дополнительные вопросы курсовая работа оценивается по четырехбалльной системе.

## 2. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТА ТТЛ

Первым разработчиком ИМС по технологии ТТЛ является фирма Texas Instrument, которая выпустила ИМС серии SN74 (отечественный аналог – 155 серия). Дальнейшие усовершенствования этой серии были направлены на повышение быстродействия и снижение потребляемой мощности.

Основные серии элементов ТТЛ включают следующий перечень номеров: 133, 155, К.155, КМ155, получившие название «стандартные серии»; 130, К.131, 599 – серии с «высоким быстродействием»; 134, 158 – «микромощная серия»; 530, К.531, 1531, 1533 – серии «с диодами Шотки» высокого быстродействия с малым потреблением мощности; К555, 533 – «микромощная серия с диодами Шотки».

Элемент ТТЛ появился как результат развития элемента ДТЛ, благодаря замене матрицы диодов многоэмиттерным транзистором (МЭТ), представляющим собой интегральный прибор, объединяющий свойства диодных логических схем и транзисторного усилителя. Функция И в МЭТ выполняется в общих для нескольких эмиттеров базовой и коллекторной областях. Основное структурное отличие МЭТ от обычных транзисторов в том, что он имеет несколько эмиттеров, расположенных таким образом, что прямое взаимодействие между ними через разъединяющий их участок пассивной базы практически исключается. Многоэмиттерный транзистор представляет собой совокупность нескольких транзисторных структур, имеющих общий коллектор и общую базу и непосредственно взаимодействующих друг с другом только за счет движения основных носителей.

### 2.1. Назначение элементов и принцип работы базовой схемы транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ)

#### Логика работы

Базовый логический элемент серий ТТЛ является элементом Шеффера (элемент И–НЕ) и реализует операцию, логическое умножение с отрицанием. Он представляет собой двоичный логический элемент, на выходе которого всегда единица, кроме случая, когда на все входы одновременно подаются логические единицы.

На рис. 2.1 показано условное обозначение элемента Шеффера на функциональных схемах ( $x_1, x_2, \dots, x_n$  – входы;  $y$  – выход). Минимальное число входов равно двум. Логика работы элемента Шеффера на три входа представлена табл. 2.1, называемой *таблицей состояний*.

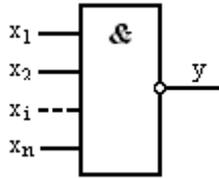


Рис. 2.1. Условное графическое обозначение элемента И-НЕ

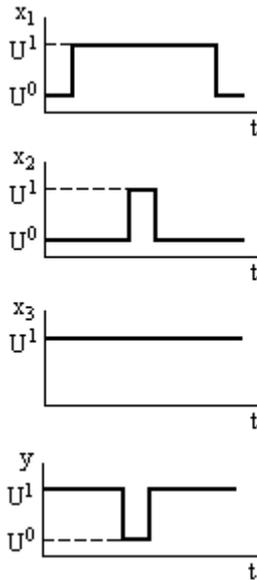


Рис. 2.2. Временная диаграмма работы элемента

Логическое уравнение работы элемента, составленное на основании табл. 2.1, записывается в виде

$$y = \overline{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3}.$$

На рис. 2.2 приведена временная диаграмма, поясняющая работу элемента на три входа, где  $U^0$  и  $U^1$  – уровни напряжений, соответствующие состояниям «0» и «1».



Количество входов у реальных схем  $K_{06} \leq 8$ . Увеличение количества входов расширяет логические возможности схемы элемента, однако ухудшает ее динамические параметры.

В зависимости от значения вытекающего тока транзистор Т2 может работать как в активном режиме, так и в режиме насыщения. В большинстве серий транзистор Т2 работает в активном режиме при небольших токах нагрузки. Резистор R4 предохраняет Т2 и D4 от перегрузки при замыкании выхода элемента «на землю». Кроме того, резистор R4 ограничивает ток в цепи коллектора транзистора Т2 при переключении элемента. Резистор R<sub>3</sub> обеспечивает запираание транзистора Т3. Последний рассчитан на большой рабочий ток и имеет малое время рассасывания. Через него ток нагрузок входит в схему элемента. Уровень напряжения  $U^0$  на выходе элемента в зависимости от тока нагрузки  $U_{\text{вых}}^0 = U_{\text{кэ.насТ}_3} = 0,05 \div 0,45 \text{ В}$ .

Способность элемента ТТЛ работать на большую емкостную нагрузку при высоких скоростях переключения объясняется тем, что заряд и разряд емкости нагрузки  $C_n$  происходят через низкоомную выходную цепь;  $i_z = I_{z2}$ ;  $i_p = I_{кз}$  (рис. 2.3). Поясним сказанное. При включении элемента, т.е. когда напряжение на выходе схемы изменяется от  $U^1$  до  $U^0$ , транзистор Т2 закрывается, а транзистор Т3 – открывается.

Ток коллектора  $I_{кз}$  обеспечивает при этом быстрый разряд емкости  $C_n$ , благодаря чему время  $t^{1,0}$  мало. При выключении элемента, т.е. когда напряжение на выходе схемы изменяется от  $U^0$  до  $U^1$ , транзистор Т3 закрывается, а транзистор Т2 открывается. Ток эмиттера  $I_{z2}$  обеспечивает при этом быстрый заряд емкости  $C_n$ , благодаря чему время  $t^{0,1}$  также мало. Таким образом, выходной каскад обеспечивает малое время переключения при значительных емкостях нагрузки.

Для базового логического элемента серий ТТЛ существуют оптимальные отношения для сопротивлений резисторов:

$$R_1/R_2 = 2 \div 4; \quad R_2/R_3 = 1 \div 2; \quad R_2/R_4 = 10. \quad (2.1)$$

Сопротивление резистора R4 выбирается исходя из заданного значения предельно допустимого тока транзисторов Т2, Т3 и диода D4 и обычно составляет

$$R_4 = 50 \div 500 \text{ Ом} . \quad (2.2)$$

### Принцип работы

Если на входы  $x_1-x_3$  схемы поданы уровни напряжения  $U^1$ , то эмиттерные переходы МЭТ смещаются в обратном направлении (МЭТ работает в инверсном активном режиме), при этом коллекторный переход

МЭТ смещен в прямом направлении и ток  $I_K$  МЭТ проходит в базу транзистора Т1. Транзисторы Т1 и Т3 открываются, и на выходе элемента имеет место уровень напряжения, соответствующий  $U_{\text{вых}}^0$ . При этом Т2 и D4 закрываются.

Если хотя бы на одном входе МЭТ, например  $x_1$ , уровень напряжения  $U_{\text{вх}}^0$ , то соответствующий эмиттерный переход МЭТ открыт и потенциал его базы  $U_{\text{б}}=U^*$ , где  $U^*$  – при падение напряжения на открытом р-переходе транзистора и диода.

Ток, задаваемый в базу МЭТ, через резистор R1 пройдет в цепь эмиттера. При этом ток коллектора МЭТ уменьшается, коллекторный переход МЭТ открывается, а напряжение на базе транзистора Т1 равно  $U_{\text{бТ1}} = U_{\text{вк}}^0 + U_{\text{остМЭТ}} < U^*$ , где  $U_{\text{остМЭТ}}$  – остаточное напряжение на насыщенном транзисторе МЭТ. Транзистор Т1 запирается, транзистор Т3 также запирается и на выходе элемента имеет место напряжение, соответствующее  $U_{\text{вых}}^1$ . При этом транзистор Т2 и диод D4 открываются. Поясним роль диода D4 в выходной части элемента.

Допустим, что диод D4 отсутствует. В этом случае, при включении элемента, т.е. когда транзистор Т3 открыт, имеют место следующие соотношения по напряжению в выходной части элемента:  $U_{\text{бТ}_2} = U_{\text{бэнасТ}_3} + U_{\text{кэнасТ}_1} = 0,7 + 0,3 = 1,0 \text{ В}$ ;  $U_{\text{эТ}_2} = U_{\text{кэнасТ}_3} = 0,3 \text{ В}$ .

Принимаем, что в режиме насыщения

$$U_{\text{бэнасТ}} = U_{\text{д}} = 0,7 \text{ В}; U_{\text{кэнасТ}} = 0,3 \text{ В}.$$

Тогда

$$U_{\text{бэнасТ}_2} = U_{\text{бэнасТ}_3} + U_{\text{кэнасТ}_1} - U_{\text{кэнасТ}_3} = U_{\text{бэнасТ}_3} = 0,7 \text{ В}.$$

Это как раз то напряжение на переходе б—э транзистора Т2, когда он открывается.

Таким образом, транзистор Т2 при отсутствии диода D4 может оказаться открытым, а уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^0$  неопределенным.

В действительности же транзистор Т2 в случае, когда элемент включен, должен быть надежно закрыт.

Допустим, что диод D4 находится в схеме элемента. Тогда при включенном элементе, т.е. когда транзистор Т3 открыт, имеют место следующие соотношения в выходной части элемента:

$$U_{\text{бэнасТ}_2} + U_{\text{д}} > U_{\text{бэнасТ}_3} + U_{\text{кэнасТ}_1} - U_{\text{кэнасТ}_3},$$

т. е.

$$U_{\text{бэнасТ}_2} + U_{\text{д}} > U_{\text{бэнасТ}_3}.$$

В числовом значении  $1,4 \text{ В} > 0,7 \text{ В}$ . Таким образом, диод D4 обеспечивает надежное запираание транзистора T2 при включенном элементе, т. е. когда на выходе элемента имеет место напряжение  $U_{\text{вых}}^0$ .

В быстродействующих схемах серий ТТЛ на входах элемента включаются входные диоды D1, D2, D3 (антизвонные), предназначенные для ограничения амплитуды отрицательных сигналов (помех), образующихся при распространении сигналов в линиях связи между ЦИС из-за отражений на концах несогласованных линий.

Положительная помеха не вызывает ложного переключения элемента.

На рис. 2.4 приведена схема элемента ТТЛ с корректирующей цепочкой. Корректирующая цепочка R5, T4, R3 для повышения помехоустойчивости в интервале входных напряжений  $0,7 \text{ В} < U_{\text{вх}} < 1,4 \text{ В}$ . В этом случае в интервале входных напряжений  $0,7 \text{ В} < U_{\text{вх}} < 1,4 \text{ В}$  эмиттерный переход транзистора T1 хотя и открывается, однако токи коллектора и эмиттера транзистора T1 не протекают до тех пор, пока не откроется транзистор T4. Когда напряжение  $U_{\text{вх}} = 1,4 \text{ В}$ , транзистор T4 открывается, затем открывается транзистор T3 и на выходе будет напряжение  $U_{\text{вых}}^0$ .

Элемент ТТЛ с корректирующей цепочкой находит применение в различных сериях, в том числе в широко распространенной серии 155 (K155, KM155).

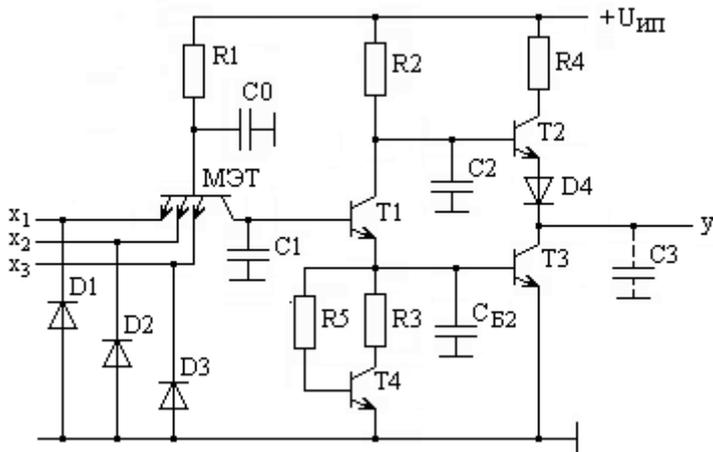


Рис. 2.4. Схема электрическая принципиальная элемента ТТЛ с корректирующей цепочкой

## 2.2. Расчет статических характеристик элемента ТТЛ

Методика и пример расчета даны для принципиальной электрической схемы элемента ТТЛ с корректирующей цепочкой (рис. 2.4).

### Исходные данные:

напряжение питания  $U_{\text{ип}} = 5\text{ В}$  (5В); коэффициент объединения по входу  $K_{\text{об.вх}} = 2 \div 9$  (2); коэффициент разветвления  $K_{\text{раз}} = 2 \div 9$  (8); коэффициент насыщения транзисторов Т1–Т4,  $K_{\text{нас}} = 1,3 \div 1,5$  (1,5); коэффициент усиления транзисторов Т1–Т4  $V = 30 \div 50$  (30); инверсный коэффициент усиления МЭТ  $V_i = 0,01 \div 0,05$  (0,05); емкость нагрузки  $C_{\text{н}} = 5 \div 100\text{ пФ}$  (30пФ); средняя мощность потребления элемента в статическом режиме  $P_{\text{п.ср}} = 10 \div 50\text{ мВт}$  (20мВт); уровень напряжения  $U_{\text{вх}}^0 = U_{\text{вых}}^0 = U^0 = 0,3\text{ В}$  (0,3В); уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^1 = U_{\text{вх}}^1 = U^1 = 3,6\text{ В}$  (3,6В); частота повторения входных сигналов  $f_{\text{п}} = 1 \div 10\text{ МГц}$  (8МГц); граничная частота усиления транзисторов Т1–Т4  $f_{\text{T}} = 500\text{ МГц} \div 10\text{ ГГц}$  (500МГц); время перехода из состояния «0» в состояние «1»  $t_{\text{вх}}^{0,1} \leq 10\text{ нс}$  (5нс); время перехода из состояния «1» в состояние «0»  $t_{\text{вх}}^{1,0} \leq 10\text{ нс}$  (4нс); температура окружающей среды  $T = 20^\circ\text{C}$ .

(Параметры, используемые в примере, взяты в круглые скобки. Перечень необходимых значений паразитных емкостей и других параметров указываются в процессе расчета.)

Принимаем падение напряжения на открытом  $p$ - $n$ -переходе транзистора и диода  $U^* = U_{\text{бэМ}} = U_{\text{бэнасТ}} = U_{\text{D}} = 0,7\text{ В}$  (0,7В); считаем, что падение напряжения на переходе  $k$ - $\varepsilon$  насыщенных транзисторов  $U_{\text{кэнасТ}} \leq 0,3\text{ В}$  (0,3В), а напряжение  $b$ - $k$  МЭТ  $U_{\text{бкМ}} \leq 0,4\text{ В}$  (0,4В).

Для типовых ИМС ТТЛ оптимальное значение резисторов определяется соотношениями [1]:

$$R_1/R_2 = 2 \div 4; \quad R_2/R_3 = 1 \div 2; \quad R_2/R_4 = 10; \quad R_2 = R_5. \quad (2.3)$$

Задаемся отношением  $R_1/R_2 = 2,5$  и определяем

$$R_2 = R_1/2,5. \quad (2.4)$$

Средняя мощность потребления элементом в статическом режиме

$$\begin{aligned}
 P_{cp} &= \frac{I_n^0 + I_n^1}{2} U_{инп}; \\
 P_{cp} &= (P_n^0 + P_n^1)/2; \\
 P_{cp} &= \\
 &= \frac{\left[ \frac{U_{инп} - 3U^*}{R_1} + \frac{U_{инп} - U_{кэнасТ1} - U^*}{R_2} + \frac{U_{инп} - U^* - U_{вх}^0}{R_1} \right]}{2} \times U_{инп};
 \end{aligned} \tag{2.5}$$

Подставляем в (2.5) значение резистора R2, определенное в (2.4) через R1, заданные значения P<sub>cp</sub>, U<sub>инп</sub>, U<sub>кэнасТ1</sub>, U<sub>вх</sub><sup>0</sup> и определяем R1:

$$\begin{aligned}
 0,02 &= \frac{\left[ \frac{5 - 3 \cdot 0,7}{R_1} + \frac{2,5 \cdot (5 - 0,3 - 0,7)}{R_1} + \frac{5 - 0,7 - 0,3}{R_1} \right]}{2} \cdot 5; \\
 R_1 &= 2,1 \text{ кОм}.
 \end{aligned}$$

Из (2.4) определяем

$$R_2 = R_1/2,5 = 0,84 \text{ кОм}.$$

Из (2.3) задаемся отношением R<sub>2</sub>/R<sub>3</sub> = 1,5 и определяем

$$R_3 = R_2/1,5 = 0,56 \text{ кОм}.$$

Из (2.3) задаемся отношением R<sub>2</sub>/R<sub>4</sub> = 10 и определяем

$$R_4 = R_2/10 = 84 \text{ Ом}.$$

Из (2.3) присваиваем значение резистора R2 резистору R5:

$$R_5 = R_2 = 0,84 \text{ кОм}.$$

Определяем входной ток логической «1» (через каждый закрытый эмиттерный переход):

$$\begin{aligned}
 I_{вх}^1 &= B_i \left( U_{инп} - U_{бкМ} - U_{бэнасТ1} - U_{бэнасТ3} \right) R_1, \tag{2.6} \\
 I_{вх}^1 &= 0,05 \cdot (-0,4 - 0,7 - 0,7) \cdot 2,1 \cdot 10^3 = 76 \text{ мкА}.
 \end{aligned}$$

Определяем входной ток логического «0» (один эмиттерный переход открыт, другие – закрыты):

$$I_{вх}^0 = \left( U_{инп} - U_{бэМ} - U_{вх}^0 \right) / R_1 + B_1 \left( U_{об.вх} - 1 \right) \quad (2.7)$$

$$I_{вх}^0 = \left( 0,7 - 0,3 \right) / 2,1 \cdot 10^3 + 0,05 \left( -1 \right) = 2 \text{ мА} .$$

Напряжение порога переключения:

$$U_{пор} = 2U^* - U_{остМ} , \quad (2.8)$$

где  $U_{остМ} = U_{кэнасМ} = 0,25 - 0,3 \text{ В}$ ,

$$U_{пор} = 2 \cdot 0,7 - 0,3 = 0,1 \text{ В} .$$

Запас помехоустойчивости по уровню «0»:

$$U_{п}^+ = 2U^* - U_{остМ} - U_{ввх}^0 , \quad (2.9)$$

$$U_{п}^+ = 2 \cdot 0,7 - 0,3 - 0,3 = 0,8 \text{ В} ;$$

запас помехоустойчивости по уровню «1»:

$$U_{п}^- = U_{инп} - 4U^* - U_{остМ} , \quad (2.10)$$

$$U_{п}^- = 5 - 4 \cdot 0,7 - 0,3 = 1,9 \text{ В} .$$

Ток, потребляемый элементом в состоянии «0» на выходе:

$$I_{п}^0 = \left( U_{инп} - 3U^* \right) / R_1 + \left( U_{инп} - U_{кэнасТ1} - U_{бэнасТ3} \right) / R_2 , \quad (2.11)$$

$$I_{п}^0 = \left( 0,7 - 3 \cdot 0,7 \right) / 2,1 \cdot 10^3 + \left( 0,7 - 0,3 - 0,7 \right) / 0,84 \cdot 10^3 = 6,1 \text{ мА} ;$$

ток, потребляемый элементом в состоянии «1» на выходе:

$$I_{п}^1 = \left( U_{инп} - U_{бэМ} - U_{вх}^0 \right) / R_1 , \quad (2.12)$$

$$I_{п}^1 = \left( 0,7 - 0,3 \right) / 2,1 \cdot 10^3 = 1,9 \text{ мА} .$$

Мощность потребления в состоянии «0» на выходе:

$$P_{п}^0 = I_{п}^0 U_{инп} , \quad (2.13)$$

$$P_{п}^0 = 6,1 \cdot 5 = 30,5 \text{ мВт} ;$$

мощность потребления в состоянии «1» на выходе:

$$P_{\text{п}}^1 = I_{\text{п}}^1 U_{\text{ип}} , \quad (2.14)$$

$$P_{\text{п}}^1 = 1,9 \cdot 5 = 9,5 \text{ мВт} .$$

Средняя мощность потребления элемента:

$$P_{\text{пср}} = \sqrt{P_{\text{п}}^0 + P_{\text{п}}^1} / 2 , \quad (2.15)$$

$$P_{\text{пср}} = \sqrt{0,5 + 9,5} / 2 = 20 \text{ мВт} \leq P_{\text{пср}} .$$

Определяем  $K_{\text{раз}}^0$  для состояния «0» на выходе элемента:

$$K_{\text{раз}}^0 = I_{\text{кТ3max}} / I_{\text{вх}}^0 . \quad (2.16)$$

Из справочных данных  $I_{\text{кТ3max}} = 30 \text{ мА}$  :

$$K_{\text{раз}}^0 = 30/2 = 15 > 8 \text{ (заданное)} .$$

Коэффициент разветвления в состоянии «1» на выходе:

$$K_{\text{раз}}^1 = \frac{U_{\text{ип}} - U_{\text{п}}^- - U^* - U_{\text{кэнасТ3}}}{R_4 \cdot I_{\text{вх}}^1} , \quad (2.17)$$

$$K_{\text{раз}}^1 = \frac{5 - 1,9 - 0,7 - 0,3}{84 \cdot 76 \cdot 10^{-6}} = 328 > 8 \text{ (заданное)} .$$

Входное сопротивление элемента при низком напряжении на входе:

$$R_{\text{вх}}^0 = R_1 = 2,1 \text{ кОм} . \quad (2.18)$$

Входное сопротивление элемента при высоком напряжении на входе ( $U_{\text{вх}} > U_{\text{пор}}$ ):

$$R_{\text{вх}}^1 = R_{\text{ут}} \geq 100 \text{ кОм} . \quad (2.19)$$

Выходное сопротивление элемента для состояния «1» на выходе в случае, когда транзистор Т2 работает в активном режиме:

$$R_{\text{вых}} = R_2 / (\beta + B) , \quad (2.20)$$

$$R_{\text{вых}} = 840 / (\beta + 30) \approx 270 \text{ Ом} .$$

Выходное сопротивление элемента для состояния «1» на выходе в случае, когда транзистор T2 работает в ежиге насыщения:

$$R_{\text{ВЫХ}}^1 = R_2 R_4 / (R_2 + R_4), \quad (2.21)$$

$$R_{\text{ВЫХ}}^1 = 840 \cdot 84 / (840 + 84) = 76 \text{ Ом}.$$

Выходное сопротивление элемента для состояния «0» на выходе:

$$R_{\text{ВЫХ}}^0 = r_{kT_3} = 10 \text{ Ом}.$$

По результатам расчетов строятся входная, передаточная и выходная статические характеристики элемента ТТЛ.

### Входная характеристика

Входная характеристика  $I_{\text{ВХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$ , где  $I_{\text{ВХ}}$ ,  $U_{\text{ВХ}}$  – входные ток и напряжение соответственно. Для получения входной характеристики используем схему, показанную на рис. 2.3. При этом на входах  $x_1$ ,  $x_2$  будет уровень напряжения  $U_{\text{ВХ}}^1$ , а на входе  $x_3$  – напряжение  $U_{\text{ВХ}}$ . За положительное направление тока принимаем ток, входящий в элемент. Изменяя напряжение на входе  $x_3$  от  $U_{\text{ВХ}}^0$  до  $U_{\text{ВХ}}^1$  и измеряя ток в цепи  $x_3$ , получим входную характеристику (рис. 2.5).

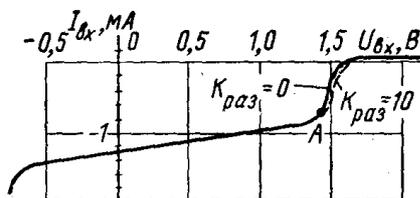


Рис. 2.5. Входная характеристика элемента ТТЛ-типа

Ток, вытекающий из входа  $x_3$  при  $U_{\text{ВХ}}^0$  (низкий уровень напряжения),

$$I_{\text{ВХ}}^0 = \left[ + \left( \frac{U_{\text{об}}}{R_1} - 1 \right) \left( U_{\text{ин}} - U_{\text{бМ}} - U_{\text{ВХ}}^0 \right) \right] R_1. \quad (2.22)$$

Ток, втекающий в каждый из закрытых входов ( $x_1$ ,  $x_2$ ) при  $U_{\text{ВХ}}^0$  (высокий уровень напряжения),

$$I_{\text{ВХ}}^1 = B_i I_{R_1} = \left( U_{\text{ин}} - U_{\text{бМ}} - U_{\text{ВХ}}^0 \right) R_1. \quad (2.23)$$

Типовые значения тока  $I_{\text{ВХ}}^0$  составляют сотни микроампер для маломощных ЦИС и единицы миллиампер для быстродействующих ЦИС.

Когда на всех входах  $U_{вх}^1$ , все эмиттерные переходы транзистора МЭТ закрыты и ток каждого из  $K_{об}$  входов определяется выражением

$$I_{вх}^1 = B_1 \left( I_{ип} - U_{бкМ} - U_{бэнасТ_1} - U_{бэнасТ_3} \right) / R_1. \quad (2.24)$$

Ток при этом находится из соотношения

$$I_{бТ_1} = \left( I_{ип} - U_{бкМ} - U_{бэнасТ_1} - U_{бэнасТ_3} \right) / R_1. \quad (2.25)$$

Типовые значения токов  $I_{вх}^1$ ,  $I_{вхКоб}^1$  составляют единицы микроампер для маломощных ЦИС и десятки микроампер для быстродействующих ЦИС.

Входное сопротивление схемы при  $U_{вх}^0$  будет

$$R_{вх}^0 \approx R_1 \quad (2.26)$$

и составляет единицы и десятки килоом. Входное сопротивление схемы при  $U_{вх}^1$  будет  $R_{вх}^1$ , оно определяется сопротивлениями утечки и зависимостью МЭТ от режима включения и составляет сотни и более килоом.

Таким образом, по входной характеристике можно определить ряд статических параметров, например таких, как  $I_{вх}^0$ ,  $I_{вх}^1$ ,  $I_{вхКоб}^1$ ,  $R_{вх}^0$ ,  $R_{вх}^1$  и др.

### Передающая характеристика

Переход схемы, показанной на рис. 2.3, из состояния «1» в состояние «0» при изменении входного напряжения происходит следующим образом. При возрастании напряжения на входе МЭТ растет напряжение и на его базе, отличаясь от входного на значение  $U_{бэМ}$ , причем ток, вытекающий из входной цепи, уменьшается, а ток  $I_2$ , втекающий в базу транзистора Т1, увеличивается. Учитывая, что при переключении тока  $I_{R1}$ , потенциалы на переходах МЭТ меняются незначительно, а значения их приблизительно одинаковы, можно сделать вывод, что напряжение базы транзистора Т1 примерно равно входному напряжению и «следит» за ним при изменении последнего. При входном напряжении, равном  $\sim 0,7$  В (точка В на рис. 2.6), транзистор Т1 открывается и начинают течь токи  $I_{К1}$  и  $I_{Э1}$ . Пока транзистор Т3 закрыт, его входное сопротивление велико, велико также входное сопротивление транзистора Т2, который в этом случае работает в активном режиме (как эмиттерный повторитель). Поэтому напряжение на коллекторе Т1 изменяется по отношению к входному с коэффициентом, приблизительно равным  $-R_2/R_3 = -1,6$ .

Следует помнить, что выходное напряжение отличается от напряжения  $U_{кТ_1}$ , приблизительно на величину  $U_{бэТ_2} + U_D$ , пока транзистор Т2 находится в активном режиме.

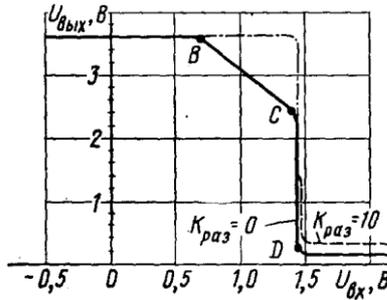


Рис. 2.6. Передаточная характеристика элемента ТТЛ-типа

При дальнейшем росте входного напряжения при  $U_{\text{вх}} \approx 1,4$  В (точка С) транзистор Т3 начинает открываться. Динамическое сопротивление перехода база—эмиттер транзистора Т3 шунтирует резистор R3, и коэффициент усиления каскада на транзисторе Т1 резко возрастает. Здесь имеет место явно выраженный случай положительной обратной связи, когда при увеличении входного напряжения, увеличивается коэффициент передачи каскада на транзисторе Т1, поэтому участок от точки С до точки D (граница насыщения транзистора Т3) практически вертикален, т. е. зафиксировать какую-либо точку на этом участке не удастся. При некотором входном напряжении вблизи точки С наблюдается момент, когда все транзисторы схемы открыты; в этом случае элемент ТТЛ-типа потребляет от источника максимальный ток (вплоть до 30 мА). Именно поэтому при переключении элемента ТТЛ-типа на фронтах наблюдаются резкие скачки тока, потребляемого от источника питания.

Переход база—эмиттер транзистора Т3 ограничивает дальнейшее нарастание напряжения на эмиттере транзистора Т1 на уровне  $\sim 0,7$  В, а на коллекторе МЭТ — на уровне  $\sim 1,4$  В, что, в свою очередь, ограничивает нарастание напряжения базы МЭТ на уровне  $\sim 2,1$  В. Во входную цепь начинает втекать ток инверсно включенного МЭТ. Потенциал на коллекторе Т1 снижается настолько, что транзистор Т2 запирается, транзисторы Т1 и Т3 переходят в насыщение, при этом на выходе получается низкое напряжение, соответствующее напряжению логического нуля.

Передаточная характеристика схемы, показанной на рис. 2.3, имеет существенный недостаток из-за наличия участка ВС, так как любая помеха в интервале входных напряжений от 0,7 до 1,4 В, накладываемая на входное напряжение  $U_{\text{вх}}^0$ , наложится и на выходное напряжение  $U_{\text{вх}}^1$  в инвертированном виде с коэффициентом передачи, равным от-

ношению  $R_2/R_3$ . В более поздних разработках элементов ТТЛ-типа резистор  $R_3$  дополняется (а точнее, заменяется) резисторно-транзисторной схемой ( $R_5, T_4$  на рис. 2.4). В этой схеме ток через транзистор  $T_2$  не течет до тех пор, пока напряжение на входе не достигнет уровня  $\sim 1,4$  В. Передаточная характеристика последней схемы дана на рис. 2.6 штрихпунктирной линией. В элементе ТТЛ-типа, показанном на рис. 2.4, происходит подавление низкочастотной помехи по любому из уровней, если величина этой помехи не достигает порога фактического переключения схемы.

У нагруженного элемента ТТЛ-типа на передаточной характеристике наблюдается «уступ» при  $U_{\text{вых}} \approx 1,4$  В, а уровень логического нуля увеличивается (на рис. 2.6 показано пунктирной линией).

### Выходная характеристика

Выходная характеристика открытого элемента ТТЛ-типа строится на основании схемы. Из схемы видно, что она является выходной характеристикой транзистора  $T_3$ .

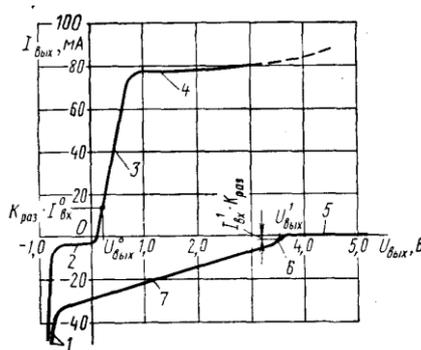


Рис. 2.7. Выходная характеристика элемента ТТЛ-типа

Выходная характеристика закрытого элемента ТТЛ-типа строится для двух случаев:

- 1) когда транзистор  $T_2$  работает в активном режиме,
- 2) когда транзистор  $T_2$  работает в насыщенном режиме.

Анализ выходных характеристик сделаем при следующих допущениях:

- 1) падение напряжения на переходе база–эмиттер транзистора  $T_2$ , работающего в активном режиме или режиме насыщения, постоянно, так же, как напряжение на диоде, не зависит от тока и равно 0,7 В;

2) в качестве границы насыщения транзистора Т2 возьмем «техническое насыщение», т. е. условие  $U_{\bar{6}} - U_{\kappa} = 0,5 \div 0,6 \text{ В}$ , а не теоретическое условие  $U_{\kappa} = U_{\bar{6}}$ ;

3) коэффициент усиления по току в схеме с общей базой (ОБ) не зависит от величины тока эмиттера.

Для первого случая можно записать:

$$\begin{aligned} I_{\text{ВЫХ}} &= I_3; \\ I_{\bar{6}} &= I_3(1 - \alpha) = I_{\text{ВЫХ}}(1 - \alpha). \end{aligned} \quad (2.27)$$

Напряжение на базе транзистора Т2:

$$U_{\bar{6}} = U_{\text{ИП}} - I_{\bar{6}}R_2 = U_{\text{ИП}} - I_{\text{ВЫХ}}(1 - \alpha)R_2. \quad (2.28)$$

Выходное напряжение элемента ТТЛ-типа:

$$\begin{aligned} U_{\text{ВЫХ}} &= U_{\bar{6}} - U_{\text{бэТ2}} - U_{\text{D}} = \\ &= U_{\text{ИП}} - I_{\text{ВЫХ}}(1 - \alpha)R_2 - U_{\text{бэТ2}} - U_{\text{D}}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Выходное сопротивление схемы в этом случае:

$$\left| \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dI_{\text{ВЫХ}}} \right| = (1 - \alpha)R_2 = R_2 / (1 + \beta). \quad (2.30)$$

Определим границу технического насыщения транзистора Т2:

$$U_{\kappa} = U_{\text{ИП}} - I_{\kappa}R_4 = U_{\text{ИП}} - \alpha R_4 I_{\text{ВЫХ}}. \quad (2.31)$$

$$U_{\text{ИП}} - (1 - \alpha)R_2 I_{\text{ВЫХ}} - 0,6 = U_{\text{ИП}} - \alpha R_4 I_{\text{ВЫХ}}, \quad (2.32)$$

откуда

$$I_{\text{ВЫХ}} = 0,6 / \left[ \alpha R_4 - (1 - \alpha)R_2 \right]. \quad (2.33)$$

Для первого случая можно записать:

$$\left. \begin{aligned} I_{\bar{6}} &= (U_{\text{ИП}} - U_{\text{бэнас}} - U_{\text{D}} - U_{\text{ВЫХ}}) / R_2; \\ I_{\kappa} &= (U_{\text{ИП}} - U_{\text{кэнас}} - U_{\text{D}} - U_{\text{ВЫХ}}) / R_4; \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

$$\begin{aligned} I_{\text{ВЫХ}} = I_{\bar{6}} - I_{\kappa} &= \frac{U_{\text{ИП}} - U_{\text{бэнас}} - U_{\text{D}} - U_{\text{ВЫХ}}}{R_2} + \\ &+ \frac{U_{\text{ИП}} - U_{\text{кэнас}} - U_{\text{D}} - U_{\text{ВЫХ}}}{R_4}. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Выходное сопротивление схемы в этом случае:

$$\left| \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dI_{\text{ВЫХ}}} \right| = \frac{R_2 R_4}{R_2 + R_4}. \quad (2.36)$$

Выходные характеристики изображены на рис. 2.7, где 1 – влияние диода коллектор-подложка транзистора Т3, 2 – транзистор Т3 в инверсном активном режиме; 3 – транзистор Т3 в режиме насыщения; 4 – транзистор Т3 в активном режиме; 5 – транзистор Т2 в режиме отсечки; 6 – транзистор Т2 в активном режиме; 7 – транзистор Т2, в режиме насыщения. Эти характеристики на участке отрицательных  $U_{\text{ВЫХ}}$  определяются шунтирующим действием паразитного диода коллектор–подложка транзистора Т3.

### 2.3. Расчет динамических параметров элемента ТТЛ

Исходные данные те же, что и для расчета статических характеристик.

К основным динамическим параметрам относятся:

- время перехода из состояния логической «1» в состояние логического «0» –  $t^{1,0}$ ;
- время перехода из состояния логического «0» в состояние логической «1» –  $t^{0,1}$ ;
- время задержки включения –  $t_{\text{зд}}^{1,0}$ ;
- время задержки выключения –  $t_{\text{зд}}^{0,1}$ ;
- время задержки распространения при включении –  $t_{\text{зд.р}}^{1,0}$ ;
- время задержки распространения при выключении –  $t_{\text{зд.р}}^{0,1}$ ;
- среднее время задержки распространения сигнала –  $t_{\text{зд.р.ср}}$ ;
- работа переключения –  $A_{\text{пер}}$ ;
- динамическая мощность –  $P_{\text{дин}}$ .

Расчет динамических параметров начинается с определения задержки включения:

$$t_{\text{зд}}^{1,0} = \tau_1 \left( U^* - U_{\text{остМ}} - U_{\text{ВЫХ}}^0 \right) \left( U_{\text{ип}} - U^* \right), \quad (2.37)$$

где

$$\tau_1 = R_1 \left( C_{\text{об.вх}} + C_{\text{эМ}} + C_{\text{пМ}} + C_{\text{э}} + C_{\text{к1}} + C_{\text{п1}} \right); \quad (2.38)$$

$C_{эзМ}$  – емкость закрытого эмиттерного перехода МЭТ;  
 $C_{пМ}$  – паразитная емкость металлических соединений изоляции резистора  $R_i$ , подключенных к базе транзистора МЭТ;  
 $C_э, C_к$  – емкости эмиттера и коллектора транзистора Т1;  
 $C_{п1}$  – паразитная емкость металлических соединений и изоляции МЭТ, подключенных к базе транзистора Т1.

В современных ИС ТТЛ с корректирующей цепочкой малой и средней степени интеграции

$$C_{эзМ} \approx C_{пМ} \approx C_э \approx C_к \approx C_{п1} = 0,5 \div 2 \text{ пФ}. \quad (2.39)$$

Принимаем

$$C_{эзМ} = C_{пМ} = C_э = C_к = C_{п1} = 1 \text{ пФ}.$$

Определяем

$$\tau_1 = 2,1 \cdot 10^{-3} \left( 1 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12} \right) = 12,6 \text{ нс},$$

$$t_{зд}^{1,0} = 12,6 \cdot 10^{-9} \left( 0,7 - 0,3 - 0,3 \right) \left( 5 - 0,7 \right) = 2,3 \text{ нс}.$$

Время спада выходного сигнала:

$$t_c = \sqrt{2R_1R_2C_{к1} \left( C_{к4} + C_3/V \right) \left( U_{ин} - 4U^* / U_{ин} - 3U^* \right)}, \quad (2.40)$$

где  $C_3 = C_{п3} + C_n$ ;

$C_n$  – емкость нагрузки (заданная в исходных данных);

$C_{п3} \approx 0,5 \div 1 \text{ пФ}$  – емкость металлических соединений и изоляции транзистора Т3 и диода D.

Принимаем  $C_{п3} = 1 \text{ пФ}$ ;  $C_{к4} = 4 \text{ пФ}$ .

Определяем  $C_3 = 1 + 30 = 31 \text{ пФ}$ .

$$\begin{aligned}
 t_c &= \\
 &= \sqrt{2 \cdot 2,1 \cdot 10^3 \cdot 0,84 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-12} \cdot \left( 4 + 31/30 \right) \cdot 10^{-12} \left( 5 - 4 \cdot 0,7 \right) \left( 5 - 3 \cdot 0,7 \right)} = \\
 &= 7,3 \text{ нс}.
 \end{aligned}$$

Время перехода из состояния «1» в состояние «0»:

$$t^{1,0} = 2t_c, \quad (2.41)$$

$$t^{1,0} = 2 \cdot 7,3 \cdot 10^{-9} = 14,6 \text{ нс}.$$

Задержка распространения при включении:

$$t_{зд,р}^{1,0} = t_{зд}^{1,0} + t_c - t_{вх}^{0,1} / 2, \quad (2.42)$$

где  $t_{вх}^{0,1}$  – время перехода из состояния «0» в состояние «1» для входного сигнала (задается в исходных данных),

$$t_{зд,р}^{1,0} = 2,3 + 7,3 - 5/2 = 7,1 \text{ нс} .$$

Определяем емкость  $C_2$ , определяющую время нарастания выходного сигнала:

$$C_2 = 2C_{к2} + C_{п2} + C_{к4} + C_3 \cdot (B+1) , \quad (2.43)$$

где  $C_{к2}$  – емкость коллекторного перехода транзистора T2;

$C_{п2} = 0,5 \div 1$  пФ – паразитная емкость металлических соединений и изоляции транзистора T1 и резистора R2, подключенных к базе транзистора T2;

$C_{к4} + C_3$  – суммарная емкость, подключенная к эмиттеру открытого транзистора T2, которая пересчитывается к его базе делением на B ( $C_{к4}$  и  $C_3$  определены выше при расчете времени спада выходного сигнала).

Принимаем  $C_{к2} = 1,5$  пФ,  $C_{п2} = 1$  пФ.

Определяем  $C_2 = 2 \cdot 1,5 + 1 + (31) \cdot (10 + 1) \approx 5$  пФ .

Постоянная времени нарастания выходного сигнала:

$$\tau_{нар} = R_2 C_2 , \quad (2.44)$$

$$\tau_{нар} = 0,84 \cdot 5 = 4,2 \text{ нс} .$$

Время нарастания выходного сигнала:

$$t_{нар} = \tau_{нар} \cdot 2U^* / (U_{ип} - 2U^*) , \quad (2.45)$$

$$t_{нар} = 4,2 \cdot 10^{-9} \cdot 2 \cdot 0,7 / (6 - 2 \cdot 0,7) \approx 1,6 \text{ нс} .$$

Время рассасывания:

$$t_{рас} = \tau_{рас} \ln 2 , \quad (2.46)$$

где  $\tau_{рас} = 10 \div 20$  нс – постоянная времени рассасывания.

Принимаем  $\tau_{рас} = 10$  нс.

Определяем:

$$t_{рас} = 10 \ln 2 = 6,9 \text{ нс} .$$

Время перехода из состояния «0» в состояние «1»:

$$t^{0,1} \approx 2t_{нар} , \quad (2.47)$$

$$t^{0,1} = 21,6 \cdot 10^{-9} = 3,2 \text{ нс}.$$

Задержка распространения при выключении:

$$t_{\text{зд.р}}^{0,1} = t_{\text{рас}} + t_{\text{нар}}, \quad (2.48)$$

$$t_{\text{зд.р}}^{0,1} = 6,9 + 1,6 = 8,5 \text{ нс}.$$

Время задержки выключения:

$$t_{\text{зд}}^{0,1} = t_{\text{рас}} + t_{\text{вх}}^{1,0} / 2, \quad (2.49)$$

где  $t_{\text{вх}}^{1,0}$  – время перехода из состояния «1» в состояние «0» для входного сигнала (задается в исходных данных).

$$t_{\text{зд}}^{0,1} = 6,9 + 4/2 = 8,9 \text{ нс}.$$

Средняя задержка распространения:

$$t_{\text{зд.р.ср}} = \sqrt{(t_{\text{зд.р}}^{1,0} + t_{\text{зд.р}}^{0,1})^2}, \quad (2.50)$$

$$t_{\text{зд.р.ср}} = \sqrt{1 + 8,5^2} = 7,8 \text{ нс}.$$

Динамическая мощность:

$$P_{\text{дин}} = U_{\text{ип}} f_{\text{п}} [C_{\text{э1}} + C_{\text{эз}} + C_{\text{бз}}] U^* + C_0 + C_1 U^* + \\ + C_{\text{к1}} + C_{\text{к2}} + C_2 [U_{\text{ип}} - U^*] + \\ + C_{\text{к3}} + C_{\text{п.вых}} + C_{\text{н}} [U^1 - U^0] + I_{\text{к3}} t_{\text{рас}}^2 / t_{\text{нас2}}, \quad (2.51)$$

где  $t_{\text{нас2}}$  – время, в течение которого транзистор Т2 входит в насыщение.

$$t_{\text{нас2}} = [C_{\text{Т}} + C_{\text{к2}} (R_4 + r_{\text{к2}})] \frac{R_2}{R_4 + r_{\text{к2}}} \frac{(U_{\text{ип}} - U^*)}{(U_{\text{ип}} - 2U^*)}. \quad (2.52)$$

Время пролета носителей через базу транзистора:

$$\tau_{\text{T}} = 1/(2\pi f_{\text{T}}), \quad (2.53)$$

где  $f_{\text{T}}$  – граничная частота усиления транзистора (задается в исходных данных).

$$\tau_{\text{T}} = 1/(2\pi \cdot 500 \cdot 10^6) = 0,3 \text{ нс}.$$

Ток короткого замыкания:

$$I_{к3} = (U_{ип} - U_{кнаст2} - U_D - U_{кнаст3}) / R_4, \quad (2.54)$$

$$I_{к3} = (-0,3 - 0,7 - 0,3) / 84 = 44 \text{ мА}.$$

Принимаем  $r_{к2} = 10 \text{ Ом}$ ,  $C_{к2} = 1,5 \text{ пФ}$ .

Время насыщения по формуле (2.52):

$$t_{нас2} = [3 \cdot 10^{-9} + 1,5 \cdot 10^{-12} \cdot (4 + 10)] \cdot \frac{840}{(4 + 10)} \cdot \frac{(5 - 0,7)}{(5 - 2 \cdot 0,7)} = 4,95 \text{ нс}.$$

Принимаем  $C_0 + C_1 = 6 \text{ пФ}$ ;  $C_{б3} = 1 \text{ пФ}$ ;  $C_2 = 5 \text{ пФ}$ ;  $C_{п.вых} = 8 \text{ пФ}$ ;  
 $C_{э1} = C_{к1} = 1 \text{ пФ}$ ;  $C_{э3} = C_{к3} = C_{э4} = C_{к4} = 4 \text{ пФ}$ .

Динамическая мощность по формуле (2.51):

$$P_{дин} = 5 \cdot 8 \cdot 1^6 \cdot [10^{-12} + 4 \cdot 10^{-12} + 1 \cdot 10^{-12}] \cdot 0,7 + 6 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 0,7 + \\ + [10^{-12} + 1,5 \cdot 10^{-12} + 5 \cdot 10^{-12}] \cdot (-0,7) + \\ + [10^{-12} + 8 \cdot 10^{-12} + 30 \cdot 10^{-12}] \cdot (6 - 0,3) + \\ + 44 \cdot 10^{-3} \cdot (9 \cdot 10^{-9})^2 / 4,95 \cdot 10^{-9} = 24 \text{ мВт}.$$

Работа переключения элемента:

$$A_{пер} = P_{п.ср} t_{зд.р.ср}, \quad (2.55)$$

$$A_{пер} = 20 \cdot 10^{-3} \cdot 7,8 \cdot 10^{-9} = 156 \text{ пДж}.$$

Полная мощность потребления элемента статическом и динамическом режиме:

$$P = P_{п.ср} + P_{дин},$$

$$P = 20 + 24 = 44 \text{ мВт}.$$

По результатам расчета динамических характеристик строятся эпюры переходного процесса в элементе ТТЛ.

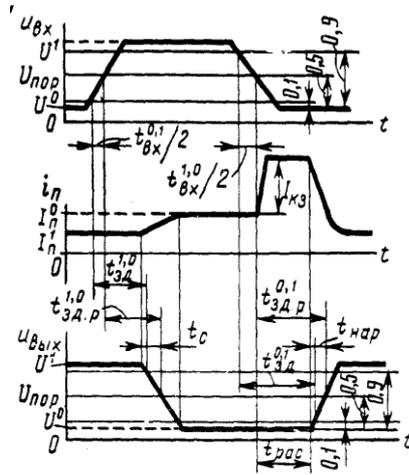


Рис. 2.8. Эпюры переходного процесса в элементе ТТЛ

### 3. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТА ЭСЛ

Эмиттерно-связанная логика (ЭСЛ) – один из вариантов логических схем, работающих в ненасыщенном режиме. ЭСЛ-схемы имеют низкий выходной импеданс, небольшой разброс уровней логического напряжения и хорошую помехоустойчивость для обоих уровней логического напряжения.

Первым разработчиком ИМС по технологии ЭСЛ была фирма Motorola, которая выпустила серию ИМС МС 10000 (отечественные аналоги – 100 и 500 серии).

Интегральные элементы эмиттерно-связанной логики или переключатели тока транзисторной логики (ПТТЛ) относятся к потенциальным элементам: «1» и «0» в потенциальной системе представляются в виде потенциалов, т. е. напряжений того или иного знака. В настоящее время промышленностью выпускается несколько серий элементов ЭСЛ (например, К137, К187, К229, 100, К500, 500 и др.), обладающих функциональной и технической полнотой, т. е. обеспечивающих выполнение любых арифметических и логических операций, а также хранение, вспомогательные и специальные функции.

#### 3.1. Назначение элементов и принцип работы базовой схемы эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ)

##### Логика работы

На рис. 3.1(а) показано условное графическое обозначение базового элемента ЭСЛ на функциональных схемах, где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – входы;  $y_1$  – инверсный выход;  $y_2$  – прямой выход. Минимальное число входов равно двум. Элемент реализует для “положительной логики” одновременно функции ИЛИ–НЕ (стрелка Пирса) по выходу  $y_1$  и функцию ИЛИ (дизъюнкция) по выходу  $y_2$ . Логика работы элемента на три входа представлена таблицей состояний (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Таблица состояний элемента ЭСЛ для «положительной» логики

$x_1$	$x_1$	$x_1$	$y_1$	$y_1$
0	0	0	1	0
1	0	0	0	1
0	1	0	0	1
0	0	1	0	1
1	1	0	0	1
1	0	1	0	1
0	1	1	0	1
1	1	1	0	1

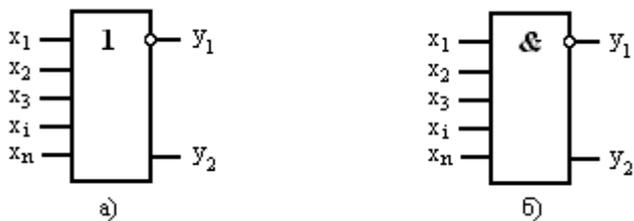


Рис. 3.1. Условное графическое обозначение элемента ЭСЛ

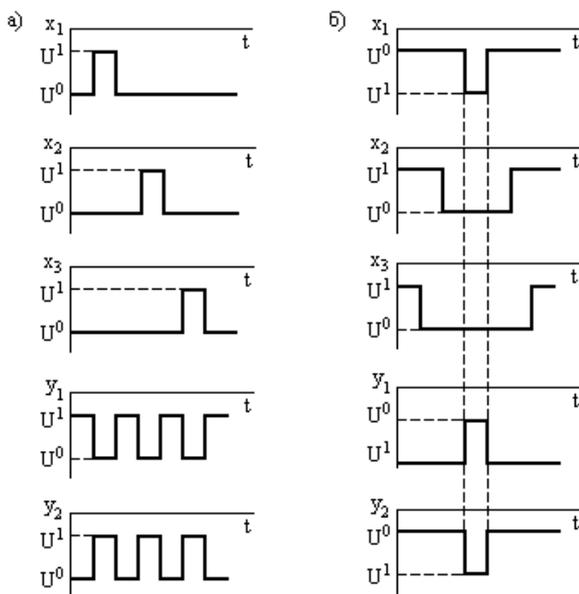


Рис. 3.2. Временная диаграмма работы элемента ЭСЛ

Логическое уравнение работы элемента, составленное по табл. 3.1, записывается в виде

$$y_1 = x_1 + x_2 + x_3; \quad y_2 = x_1 + x_2 + x_3. \quad (3.1)$$

В (3.1) знак плюс соответствует дизъюнкции, т. е. логическому сложению.

На рис. 3.2(а) приведена временная диаграмма, поясняющая логику работы элемента ЭСЛ на три входа.



На рис. 3.2(б) приведена временная диаграмма, поясняющая логику работы элемента в соответствии с табл. 3.2.

### Назначение элементов

Схема элемента ЭСЛ, показанная на рис. 3.3, состоит из:

1) дифференциального усилителя (токовый переключатель), содержащего две ветви, работающие в ключевом режиме (первая ветвь на транзисторах Т1–Т3, вторая – на транзисторе Т4, транзисторы работают в активной области и не входят в состояния насыщения, обе ветви усилителя связаны эмиттерами через резистор R3, источник напряжения питания  $U_{\text{пит}}$  и резистор R3 образуют генератор тока  $I_{R3}$ );

2) источника опорного напряжения на транзисторе Т5 и диодах D1 и D2, обеспечивающих температурную компенсацию изменения тока  $I_{R3}$  из-за изменения напряжения  $U_{\text{бэ}}$  транзисторов Т4{Т1–Т3} и Т5;

3) выходных эмиттерных повторителей на транзисторах Т6, Т7.

### Принцип работы

Рассмотрим *принцип работы элемента ЭСЛ с положительной логикой* (при анализе динамического режима работы следует учитывать наличие эквивалентных емкостей на выходах токового переключателя и эмиттерных повторителей).

Выбираем средние значения напряжений, соответствующие состояниям «0» и «1», т. е.  $U_{\text{ср}}^0 = -1,625 \text{ В}$ ,  $U_{\text{ср}}^1 = -0,825 \text{ В}$ . Напряжение  $U_{\text{оп}}$  – среднее значение между уровнями «0» и «1», т.е.  $U_{\text{оп}} = \frac{U_{\text{ср}}^0 + U_{\text{ср}}^1}{2} = -1,25 \text{ В}$ ; следовательно,  $U_{\text{ср}}^0 < U_{\text{оп}} < U_{\text{ср}}^1$ . Далее принимаем  $U_{\text{ср}}^0 = U_{\text{вх}}^0$ ,  $U_{\text{ср}}^1 = U_{\text{вх}}^1$ .

**Случай 1.** На входах  $x_1$ – $x_3$  уровень напряжения  $U_{\text{вх}}^0$ , транзисторы Т1–Т3 закрываются, транзистор Т4 открывается и ток проходит через правую ветвь. При этом на коллекторах транзисторов Т1–Т3 будет уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^1$ , а на коллекторе транзистора Т4 – уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^0$ . В этом случае эмиттеры транзисторов Т1–Т4 находятся под напряжением  $U_3 = U_{\text{оп}} - U_{\text{бэТ4}} = -1,95 \text{ В}$  (принимаем  $U_{\text{бэТ}} = 0,7 \text{ В}$ ). Разность напряжений между базой и эмиттером транзисторов Т1–Т3 равна  $U_{\text{бэ}} = U_{\text{вх}}^0 - U_3 = 0,325 \text{ В}$ , что недостаточно для открывания транзисторов Т1–Т3.

Ток  $I_{R3}$  определяется напряжением  $U_3$ , сопротивлением резистора R3 и проходит через открытый транзистор Т4. На резисторе R2 создается падение напряжения  $U_{R2} = -R_2(I_{\text{КТ4}} + I_{\text{Т7}}) = -0,925 \text{ В}$ ; при этом  $R_2 I_{\text{КТ4}} = -0,8 \text{ В}$ ;  $R_2 I_{\text{Т7}} = -0,125 \text{ В}$ .

Уровень напряжения на выходе  $y_2$  с учетом падения напряжения на переходе  $U_{\text{бэТ4}} = 0,7$  В равен  $U_{y_2}^0 = U_{R_2} - U_{\text{бэТ7}} = -1,625$  В. Уровень напряжения на выходе  $y_1$  с учетом падения напряжения на переходе  $U_{\text{бэТ6}} = 0,7$  В равен  $U_{y_1}^1 = U_{R_1} - U_{\text{бэТ6}} = -0,825$  В;  $U_{R_1} = I_{\text{бТ6}}R_1 = -0,125$  В.

Таким образом, уровни напряжений на выходах  $y_1$  и  $y_2$  определены.

**Случай 2.** Хотя бы на одном входе, например входе  $x_1$ , уровень напряжения  $U_{\text{вх}}^1$ , транзистор Т1 открывается и ток проходит через левую ветвь. Транзистор Т4 при этом закрывается. На коллекторах транзисторов Т1–Т3 – уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^0$ , а на коллекторе транзистора Т4 – уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^1$ . В этом случае напряжение на эмиттерах транзисторов Т1–Т4 будет  $U_3 = U_{\text{вх}}^1 - U_{\text{бэТ1}} = -1,525$  В. Разность напряжений между базой и эмиттером транзистора Т4 составит  $U_{\text{бэТ4}} = U_{\text{оп}} - U_3 = 0,275$  В, что недостаточно для отпириания транзистора Т4.

За счет тока, проходящего через резистор  $R_1$ , напряжение на коллекторах объединенных транзисторов  $U_{R_1} = -0,925$  В. При этом  $R_1 I_{\text{кТ1}} = -0,8$  В;  $R_1 I_{\text{бТ6}} = -0,125$  В. Уровень напряжения на выходе  $y_1$  с учетом падения напряжения на переходе  $U_{\text{бэТ6}} = 0,7$  В равен

$$U_{y_1}^0 = U_{R_1} - U_{\text{бэТ6}} = -1,625 \text{ В.}$$

Уровень напряжения на выходе  $y_2$  с учетом падения напряжения на переходе  $U_{\text{бэТ6}} = 0,7$  В будет

$$U_{y_2}^1 = U_{R_2} - U_{\text{бэТ7}} = -0,825 \text{ В; } U_{R_2} = -I_{\text{бТ7}}R_2 = -0,125 \text{ В.}$$

Таким образом, напряжения на выходах  $y_1$  и  $y_2$  для случая 2 определены.

Следовательно, воздействия входного сигнала приводят к переключению тока эмиттера  $I_{R_3}$ , который проходит в зависимости от амплитуды входного сигнала то через левую, то через правую ветвь. При этом на выходе создаются низкий и высокий уровни напряжения одновременно (из-за этого схему и называют токовым ключом).

Обычно сопротивление  $R_3$  в несколько раз больше сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ . Это позволяет получать постоянный ток в ветвях дифференциального усилителя при переключении его из одной ветви в другую в зависимости от сигналов управления.

В серийных ИС ЭСЛ коллекторные цепи заземляются, а напряжение питания отрицательной полярности подключается к эмиттерным цепям. В ряде серий элементов ЭСЛ имеются отдельные шины “Земля” и отдельные шины питания (например,  $U_{\text{инп1}} = -5,2$  В,  $U_{\text{инп2}} = -2$  В для усилительной части и эмиттерных повторителей элементов серии 100). Такое включение обеспечивает меньшую зависимость напряжения на выходе от наводок по цепи питания и лучшую помехоустойчивость.

Для одного из вариантов серий ЭСЛ номинальные значения величин следующие (рис. 3.3):  $R_1 = 0,25$  кОм;  $R_2 = 0,3$  кОм;  $R_3 = 1,1$  кОм;  $R_4 =$

0,5÷1 кОм;  $R_5 = 0,27$  кОм;  $R_6 = R_7 = 1,1$  кОм;  $R_8 = 1$ Д кОм;  $R_9 = 50$  кОм; резисторы  $R_6$  – резисторы утечки. Такое включение резисторов  $R_6$  позволяет оставлять неиспользуемые входы свободными.

Выходные эмиттерные повторители на транзисторах Т6, Т7 обеспечивают формирование выходных сигналов, высокую нагрузочную способность элемента, развязку между переключателем тока и нагрузкой, а также симметричность выходных сигналов относительно опорного напряжения  $U_{оп} = -1,25$  В. Поясним это положение: на коллекторах транзисторов Т1–Т4 средние уровни переключаемых напряжений оказываются смещенными в сторону повышения по отношению к средним уровням напряжений выходных сигналов. Это смещение компенсируется смещением уровней напряжений выходных сигналов в сторону понижения за счет падения напряжения на переходах база–эмиттер транзисторов Т6, Т7. Для увеличения количества входов в смене элемента предусмотрены расширители по ИЛИ. Последние представляют собой схему, состоящую из нескольких транзисторов, эмиттеры и коллекторы которых объединены аналогично объединению транзисторов Т1–Т3 основной схемы. Такой расширитель соединяется с коллекторами и эмиттерами основной схемы (выводы А, В на рис. 3.3). Максимальное число входов, получаемых таким образом, равно 9.

В элементах ЭСЛ допускается объединение прямых и инверсных выходов одних элементов с прямыми и инверсными выходами других элементов, а также прямого и инверсного выходов одного и того же элемента.

Рассмотрим *принцип работы элемента ЭСЛ с отрицательной логикой* (рис. 3.3). В этом случае  $U_{вх}^0 = -0,825$  В;  $U_{вх}^1 = -1,625$  В;  $U_{оп} = -1,25$  В; элемент реализует функции И–НЕ по выходу  $y_1$  и И по выходу  $y_2$ .

**Случай 1.** На все входы элемента одновременно подаются сигналы, соответствующие  $U_{вх}^1$ , транзисторы Т1–Т3 закрываются, а транзистор Т4 открывается, так как напряжение на его базе выше, чем на базах транзисторов Т1–Т3, и через него проходит ток эмиттера транзистора Т4, задаваемый резистором R3. Этот ток, уменьшенный на значение тока базы транзистора Т4, создает на резисторе R2 падение напряжения  $U_{R2} = -0,925$  В. С учетом падения напряжения на переходе база–эмиттер транзисторов эмиттерных повторителей  $U_{бэ} = 0,7$  В получим на прямом выходе  $y_2$  уровень напряжения  $U_{вых} = -1,625$  В, а на инверсном выходе  $y_1$  уровень напряжения  $U_{вых}^0 = -0,825$  В.

**Случай 2.** На один вход элемента, например вход  $x_1$ , подается сигнал, соответствующий  $U_{вх}^0$ , транзистор Т1 открывается, а транзистор Т4 закрывается. В этом случае на прямом выходе  $y_2$  будет уровень напряжения  $U_{вых}^0 = -0,825$  В, а на инверсном выходе  $y_1$  – уровень напряжения  $U_{вых}^1 = -1,625$  В.

Специфические особенности элемента ЭСЛ – наличие парафазного выхода, позволяющего снимать одновременно прямые и инверсные значения реализуемой функции (в аппаратуре это дает заметное снижение общего количества микросхем); наличие эмиттерных повторителей, обеспечивающее малое выходное сопротивление микросхем, что удобно при согласовании элементов в процессе построения сложных схем; работа транзисторов в ненасыщенном режиме, благодаря чему из задержек переключения исключается рассасывание заряда в транзисторах; использование малых перепадов напряжений сигналов, что способствует повышению быстродействия элемента; возможность объединения выходов нескольких элементов для расширения логических функций.

Приведем в качестве примера основные статические параметры элемента ЭСЛ серии К137: уровни напряжений  $U^1 = -0,7 \div -0,9$  В;  $U^0 = -1,45 \div -1,9$  В; входной ток  $I_{вх}^1 = 0,2$  мА; ток через резистор эмиттерного повторителя  $I_{RЭ} = 4,5 \div 9$  мА; ток потребления  $I_{п} = 15$  мА; мощность переключения  $P_{п} = 70$  мВт; коэффициент объединения по входу  $K_{об} = 9$ ; коэффициент разветвления по выходу  $K_{раз} = 15$ ; коэффициент объединения по выходу  $K_{об.вых} = 5$ ; напряжение источника питания  $U_{ип} = -5,2$  В; температурный диапазон работы  $\Delta t = 10 \div 70^\circ\text{C}$ ; время задержки включения  $t_{зд}^{1,0} = 6$  нс; время задержки выключения  $t_{зд}^{0,1} = 6$  нс; средняя задержка распространения  $t_{зд,р.ср} = 6$  нс.

У некоторых элементов серий ЭСЛ резисторы R6, R7 не соединены непосредственно с транзисторами эмиттерных повторителей. Если же такое имеется (эмиттеры транзисторов эмиттерных повторителей нескольких элементов подсоединены на одну нагрузку, а остальные нагрузки не использованы), то на выходе будет функция  $y = y_1 + y_2 + \dots + y_n$ , что и определяет  $K_{об.вых}$ .

### 3.2. Методика и пример расчета статических характеристик элемента ЭСЛ

Методика и пример расчета даны для принципиальной электрической схемы элемента ЭСЛ (рис. 3.3).

#### **Исходные данные:**

напряжение источника питания  $U_{ин} = -3 \div 5,2$  В ( $-5$  В); коэффициент объединения по входу  $K_{об} = 2 \div 9$  (3); коэффициент разветвления  $K_{раз} = 10 \div 100$  (20); коэффициент усиления транзисторов в статическом режиме  $\beta = 30 \div 50$  (30); емкость нагрузки  $C_n = 10 \div 300$  пФ (30 пФ); мощность потребления  $P_{ср} = P = 10 \div 150$  мВт (80 мВт); полярность логики: положительная, отрицательная (положительная); на-

пряжение логического «0»  $U_{\text{вх}}^0 = U_{\text{вых}}^0 = U^0 = -1,45 \div -1,9 \text{ В}$  (-1,6 В);  
 напряжение логической «1»  $U_{\text{вх}}^1 = U_{\text{вых}}^1 = U^1 = -0,7 \div -0,95 \text{ В}$  (-0,8 В);  
 граничная частота усиления транзисторов  $f_T = 800 \text{ МГц} \div 10 \text{ ГГц}$   
 (800 МГц); время перехода из состояния «0» в состояние «1» для входного сигнала  $t_{\text{вх}}^{0,1} = 0,1 \div 10 \text{ нс}$  (3 нс); время перехода из состояния «1» в состояние «0» для входного сигнала  $t_{\text{вх}}^{1,0} = 0,1 \div 10 \text{ нс}$  (2 нс); температура окружающей среды  $T=20^\circ\text{C}$ .

(Параметры, используемые при расчете, взяты в круглые скобки. Перечень значений паразитных емкостей указывается в процессе расчета.)

Принимаем падение напряжения на открытом *p-n*-переходе транзисторов (в том числе транзисторов нагрузки), диодов одинаковыми, т. е.  $U_{\text{бэТ}} = U_{\text{бэТн}} = U_D = U^* = 0,7 \text{ В}$ .

При разработке схем ЭСЛ рекомендуются следующие соотношения между резисторами схемы, приведенной на рис. 3.3 [2]:

$$R_4 = (2 \div 4)R_1; \quad R_5 = R_1; \quad R_3 = R_6 = R_7 = R_8 = (2,5 \div 5)R_1; \quad (3.2)$$

$$R_2 = 1,1 \div 1,2R_1.$$

Выбираем:

$$R_7 = 3,3R_1; \quad R_4 = 3R_1; \quad R_2 = 1,18R_1. \quad (3.3)$$

Мощность, потребляемая элементом ЭСЛ с учетом коэффициента разветвления, определяется соотношением

$$P = U_{\text{ип}} \left[ \frac{-(U^1 - U^0)}{R_1} + \frac{U_{\text{ип}} - U_{\text{оп}}}{R_4} + \frac{U_{\text{ип}} - 2U^*}{R_5 + R_8} + \frac{U_{\text{ип}} - U^0}{R_6} + \frac{U_{\text{ип}} - U^1}{R_7} + K_{\text{раз}} + \frac{U_{\text{ип}} - (U^1 - U^*)}{R_3(1 + \beta)} \right], \quad (3.4)$$

где

$$U_{\text{оп}} = \frac{U^1 + U^0}{2}, \quad (3.5)$$

$$U_{\text{оп}} = \frac{-0,8 + (-1,6)}{2} = -1,2 \text{ В}.$$

Пользуясь формулами (3.2) и (3.3), определяем значения сопротивлений резисторов схемы через  $R_1$  и по заданным значениям  $P_{\text{ср}}=P$ ,  $U_{\text{ип}}$ ,  $U^1$ ,  $U^0$ ,  $U^*$ ,  $K_{\text{раз}}$  вычисляем  $R_1$ :

$$0,08 = -5 \cdot \left\{ \frac{-0,8 - (-1,6)}{R_1} + \frac{-5 - (-1,2)}{3R_1} + \frac{-5 - (-2 \cdot 0,7)}{R_1 + 3,33R_1} + \frac{-5 - (-1,6)}{3,3R_1} + \frac{-5 - (-0,8)}{3,3R_1} + 20 \cdot \frac{-5 - [0,8 - (-1,7)]}{3,3R_1(1+30)} \right\}$$

$$R_1 = 0,365 \text{ кОм}$$

Из соотношений (3.2) и (3.3) определяем значения сопротивлений резисторов:

$$R_2 = 1,18 \cdot 0,365 = 0,43 \text{ кОм};$$

$$R_3 = R_6 = R_7 = R_8 = 3,33 \cdot 0,365 = 1,2 \text{ кОм};$$

$$R_4 = 3 \cdot 0,365 = 1,1 \text{ кОм};$$

$$R_5 = 0,365 \text{ кОм}.$$

Принимаем  $R_6 = 50 \text{ кОм}$  [1].

Входной ток логической «1» (через каждый открытый эмиттерный переход):

$$I_{\text{вх}}^1 = \left( U_{\text{вх}}^1 - U_{\text{бэТ}_1} - U_{\text{ип}} \right) / R_3 \cdot (\alpha + \beta) \quad (3.6)$$

$$I_{\text{вх}}^1 = [0,8 - 0,7 - (-5)] / [2 \cdot 10^3 (\alpha + 30)] = 0,09 \text{ мА}.$$

Входной ток логического «0», определяемый сопротивлением резистора  $R_6$  в цепи базы закрытого транзистора:

$$I_{\text{вх}}^0 = |U_{\text{вх}}^0| / R_6 \quad (3.7)$$

$$I_{\text{вх}}^0 = |-1,6| / 50 \cdot 10^3 = 0,032 \text{ мА}.$$

Напряжение порога переключения:

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{оп}} \quad (3.8)$$

$$U_{\text{пор}} = -1,2 \text{ В}.$$

Ширина активной зоны (определяется по уровням 0,1 и 0,9 от перехода выходного напряжения) практически не зависит от параметров схемы [7]:

$$\Delta U_{\text{вх}} \approx 0,13 \div 0,2 \text{ В} \quad (3.9)$$

Принимаем для всех вариантов

$$\Delta U_{\text{вх}} = 0,15 \text{ В}.$$

Логический перепад напряжения:

$$U_{\text{лог}} = U_{\text{ВЫХ}}^1 - U_{\text{ВЫХ}}^0, \quad (3.10)$$

$$U_{\text{лог}} = -0,8 - (-1,6) = 0,8 \text{ В}.$$

Напряжение статической помехоустойчивости по уровням «0» и «1»:

$$U_{\Pi}^+ = U_{\Pi}^- = 0,5(U_{\text{лог}} - \Delta U_{\text{ВХ}}), \quad (3.11)$$

$$U_{\Pi}^+ = U_{\Pi}^- = 0,5(0,8 - 0,15) = 0,325 \text{ В}.$$

Ток логической части элемента ЭСЛ:

$$I_{\text{л}} = -U_{\text{лог}}/R_1, \quad (3.12)$$

$$I_{\text{л}} = -0,8/0,365 \cdot 10^3 = -2,19 \text{ мА}.$$

Токи эмиттерных повторителей:

$$I_{\text{эп1}} = (U_{\text{ин}} - U^0)/R_6, \quad (3.13)$$

$$I_{\text{эп1}} = [5 - (-1,6)]/1,2 \cdot 10^3 = -2,83 \text{ мА}.$$

$$I_{\text{эп2}} = (U_{\text{ин}} - U^1)/R_7 - K_{\text{раз}} I_{\text{ВХ}}^1, \quad (3.14)$$

$$I_{\text{эп2}} = [5 - (-0,8)]/1,2 \cdot 10^3 - 20 \cdot 0,09 = -5,3 \text{ мА}.$$

Суммарный ток эмиттерных повторителей:

$$I_{\text{эп}} = I_{\text{эп1}} + I_{\text{эп2}}, \quad (3.15)$$

$$I_{\text{эп}} = -2,83 - 5,3 = -8,13 \text{ мА}.$$

Токи источника опорного напряжения:

$$I_{\text{оп1}} = (U_{\text{ин}} - U_{\text{оп}})/R_4, \quad (3.16)$$

$$I_{\text{оп1}} = [5 - (-1,2)]/1,1 \cdot 10^3 = -3,45 \text{ мА}.$$

$$I_{\text{оп2}} = (U_{\text{ин}} - 2U^*)/(R_5 + R_8), \quad (3.17)$$

$$I_{\text{оп2}} = [5 - 2(-0,7)]/(0,365 \cdot 10^3 + 1,2 \cdot 10^3) = -2,3 \text{ мА}.$$

Суммарный ток источника опорного напряжения:

$$I_{\text{оп}} = I_{\text{оп1}} + I_{\text{оп2}}, \quad (3.18)$$

$$I_{\text{оп}} = -3,45 - 2,3 = -5,75 \text{ мА} .$$

Общий ток, потребляемый элементом ЭСЛ, приблизительно одинаков для состояний «1» и «0» и равен сумме перечисленных токов:

$$I_{\text{п}}^0 \approx I_{\text{п}}^1 = I_{\text{л}} + I_{\text{эп}} + I_{\text{оп}} , \quad (3.19)$$

$$I_{\text{п}}^0 \approx I_{\text{п}}^1 = -2,19 - 8,13 - 5,75 = -16,07 \text{ мА} .$$

Мощность потребления логической части элемента:

$$P_{\text{л}} = U_{\text{ип}} \cdot I_{\text{л}} , \quad (3.20)$$

$$P_{\text{л}} = -5 \cdot (-2,19) = 10,95 \text{ мВт} .$$

Мощность потребления эмиттерными повторителями:

$$P_{\text{эп}} = U_{\text{ип}} \cdot I_{\text{эп}} , \quad (3.21)$$

$$P_{\text{эп}} = -5 \cdot (-8,13) = 40,65 \text{ мВт} .$$

Мощность потребления источником опорного напряжения:

$$P_{\text{оп}} = U_{\text{ип}} \cdot I_{\text{оп}} , \quad (3.22)$$

$$P_{\text{оп}} = -5 \cdot (-5,75) = 28,75 \text{ мВт} .$$

Суммарная мощность потребления элементом (одинаковая для состояний «0» и «1»):

$$P = P_{\text{ср}} = P_{\text{л}} + P_{\text{эп}} + P_{\text{оп}} , \quad (3.23)$$

$$P = P_{\text{ср}} = 10,95 + 40,65 + 28,75 = 80 \text{ мВт} .$$

Коэффициент разветвления для первого эмиттерного повторителя (выход  $y_1$ ):

$$K_{\text{раз1}} = \frac{-U_{\text{вых1}} - U_{\text{бэГ}_6}}{R_1} \cdot \frac{R_3 \cdot (1 + \beta)}{I_{\text{вх}}^1 - U_{\text{бэН}} - U_{\text{ип}}} , \quad (3.24)$$

$$K_{\text{раз1}} = \frac{-1,08 - 0,7}{365} \cdot \frac{1,2 \cdot 10^3 \cdot (1 + \beta)}{-0,8 - 0,7 - (-5)} = 89 > 20 (\text{заданного}) .$$

Коэффициент разветвления для второго эмиттерного повторителя:

$$K_{\text{раз2}} = \frac{-U_{\text{вых2}} - U_{\text{бэГ}_7}}{R_2} \cdot \frac{R_3 \cdot (1 + \beta)}{I_{\text{вх}}^1 - U_{\text{бэН}} - U_{\text{ип}}} , \quad (3.25)$$

$$K_{раз1} = \frac{-\left[0,8 \cdot 0,7\right] \cdot 1,2 \cdot 10^3 \cdot (0+1)^2}{430 \cdot (-0,8 - 0,7 - (-5))} = 77 > 20(\text{заданного}).$$

Входное сопротивление элемента, когда на входе действует напряжение логического «0»:

$$R_{вх}^0 = R_6 = 50 \text{ кОм}. \quad (3.26)$$

Входное сопротивление элемента, когда на входе действует напряжение логической «1»:

$$R_{вх}^1 = (1+\beta)R_3, \quad (3.27)$$

$$R_{вх}^1 = (1+30) \cdot 1,2 \cdot 10^3 = 37,2 \text{ кОм}.$$

Выходное сопротивление элемента на выходе  $y_1$ , когда на выходе действует напряжение логического «0»:

$$R_{вых}^0 = \frac{R_1 R_6 / (1+\beta)}{R_1 / (1+\beta) + R_6}, \quad (3.28)$$

$$R_{вых}^0 = \frac{0,365 \cdot 1,2 / (1+30)}{0,365 / (1+30) + 1,2} = 12 \text{ Ом}.$$

Выходное сопротивление элемента на выходе  $y_1$ , когда на выходе действует напряжение логической «1»:

$$R_{вых}^1 = R_{вых}^0 = 12 \text{ Ом}. \quad (3.29)$$

Выходное сопротивление элемента на выходе  $y_2$ , когда на выходе действует напряжение логического «0»:

$$R_{вых}^0 = \frac{R_2 R_7 / (1+\beta)}{R_2 / (1+\beta) + R_7}, \quad (3.30)$$

$$R_{вых}^0 = \frac{0,43 \cdot 1,2 / (1+30)}{0,43 / (1+30) + 1,2} = 14 \text{ Ом}.$$

По результатам расчетов строятся входная, передаточная и выходная статические характеристики элемента ЭСЛ.

### Входная характеристика

Входная характеристика  $I_{вх} = f(U_{вх})$ , где  $I_{вх}$  и  $U_{вх}$  – соответственно ток и напряжение на входе схемы.

Для снятия входной характеристики используем схему, показанную на рис. 3.3. Характеристику будет снимать для одного входа; нагрузкой элемента являются аналогичные элементы. На входах  $x_2, x_3$  – уровни напряжения  $U_{вх}^0$ , а на входе  $x_1$  – напряжение  $U_{вх}$ . Изменяя напряжение на входе  $x_1$  от  $U_{вх} \leq U^0$  до  $U_{вх} \geq U^1$  и измеряя ток в цепи входа  $x_1$ , получим входную характеристику (рис. 3.4).

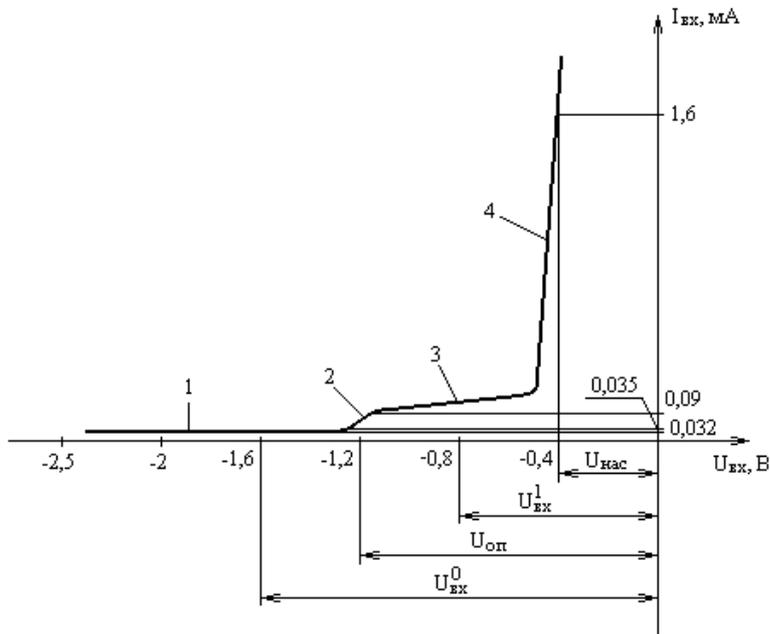


Рис. 3.4. Входная характеристика элемента ЭСЛ

На входной характеристике можно выделить четыре участка, соответствующие четырем возможным режимам работы входной цепи, т. е. элемента. Участок 1 характеризуется условием  $U_{вх} \leq U_{вх}^0$ , поэтому транзистор Т1 закрыт; входной ток определяется сопротивлением базового резистора  $R_б$ , подключенного ко входу:

$$I_{вх}^0 = U_{вх}^0 / R_б . \quad (3.31)$$

Для  $U_{вх}^0 = -1,6$  В,  $R_б = 50$  кОм,  $I_{вх}^0 = 0,032$  мА.

Входное сопротивление элемента на участке 1 велико и равно

$$R_{вх}^0 = R_б . \quad (3.32)$$

С учетом наличия  $R_6$  на всех входах, входное сопротивление элемента  $R_{вх}^0 = R_6/K$ , где  $K$  – количество входов элемента.

Участок 2 характеризуется условием  $U_{вх} \geq U_{оп}$ , поэтому при увеличении  $U_{вх}$  транзистор Т1 начинает открываться, входной ток возрастает. Нелинейный участок 2 определяется возрастающим током базы. При этом ток  $I_{R_1}$  также возрастает, а ток  $I_{R_2}$  уменьшается. Входное сопротивление элемента мало и равно

$$R_{вх} \approx 4\varphi_T \beta R_1 / U_{л}. \quad (3.33)$$

При  $\varphi_T = 30$  мВ,  $\beta = 30$ ,  $R_1 = 365$  Ом получим  $R_{вх} = 1,6$  кОм. Входной ток при  $U_{вх} = U_{пор}$ :

$$I_{вх} = 0,5 I_{R_3} / (\alpha + \beta), \quad (3.34)$$

где  $I_{R_3} \approx U_{л} / R_1$ .

Принимаем  $U_{л} = U^1 - U^0 = 0,8$  В, тогда  $I_{R_3} = 2,19$  мА, а  $I_{вх} = 0,035$  мА.

Участок 3 характеризуется условием  $U_{оп} < U_{вх} \leq U_{вх}^1$ , поэтому входной транзистор открыт. Входной ток незначительно растет из-за увеличения тока эмиттера транзистора Т1 и тока через базовый резистор. При этом ток  $I_{R_3}$  резко возрастает, также возрастает напряжение  $U_{R_3}$ , в результате чего резко увеличивается дифференциальное входное сопротивление схемы. На этом участке имеется напряжение  $U_{нас}$ , соответствующее границе насыщения входного транзистора.

Входная характеристика на участке 3 определяется выражением

$$I_{вх} = (U_{вх} - U_{бэТ1} - U_{ип}) / R_3 (\alpha + \beta) \quad (3.35)$$

Для значений  $U_{вх} = U_{вх}^1 = -0,09$  В,  $U_{бэТ1} = 0,7$  В,  $U_{ип} = -5$  В,  $R_3 = 1,2$  кОм,  $\beta = 30$  значение  $I_{вх}^1 = 0,09$  мА.

Входное сопротивление элемента на участке 3 определяется выражением

$$R_{вх}^1 = (\alpha + \beta) R_3 = 37,2 \text{ кОм}. \quad (3.36)$$

Участок 4 характеризуется условием  $U_{вх} \geq U_{нас}$ ; при этом транзистор Т1 на входе открывается до состояния насыщения (ток базы транзистора значительно увеличивается при повышении напряжения). Входной ток на участке 4 определяется выражением

$$I_{вх} = I_{R_3} - I_{R_1} = \frac{U_{вх} - U_{бэнас} - U_{ип}}{R_3} - \frac{-U_{вх} + U_{бэнас} + U_{кэнас}}{R_1}.$$

При  $U_{\text{вх}} = -0,4 \text{ В}$ ;  $U_{\text{кю нас}} = 0,3 \text{ В}$  получим  $I_{\text{вх}} = 1,6 \text{ мА}$ .

Входное сопротивление элемента на участке 4 определяется выражением  $R_{\text{вх}} = R_1 R_3 / (R_1 + R_3)$ . Для значений  $R_1 = 0,365 \text{ кОм}$ ;  $R_3 = 1,2 \text{ кОм}$  получим  $R_{\text{вх}} = 280 \text{ Ом}$ .

Анализ входной характеристики показывает, что участок 1 соответствует состоянию «0» на входе элемента, участок 3 – состоянию «1», участок 2 – переходной; участок 4 – насыщению входного транзистора; работа элемента на участке 4 недопустима из-за увеличения средней задержки.

Для участков 1 и 3 входное сопротивление элемента велико, а для участков 2 и 4 – мало.

### Передаточная характеристика

Передаточная характеристика  $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ , где  $U_{\text{вых}}$ ,  $U_{\text{вх}}$  – соответственно напряжение на выходе и входе схемы. Для снятия передаточной характеристики используем схему, показанную на рис. 3.3. Характеристика снимается для одного входа (нагрузкой элемента являются аналогичные элементы).

На входах  $x_2$ ,  $x_3$  будет уровень напряжения  $U_{\text{вх}}^0$ , а на входе  $x_1$  – напряжение  $U_{\text{вх}}$ . Изменяя напряжение на входе  $x_1$  от  $U_{\text{вх}} \leq U_{\text{вх}}^0$  до  $U_{\text{вх}} \geq U_{\text{вх}}^1$  и измеряя напряжение на входе  $x_1$  и на выходах схемы  $y_1$  и  $y_2$ , получим передаточную характеристику.

На рис. 3.5 приведена передаточная характеристика по прямому  $y_2$  и инверсному  $y_1$  выходам. На характеристике по инверсному выходу можно выделить рабочие точки: 1, соответствующую «1», и 4, соответствующую «0». Взаимное пересечение прямой и инверсной передаточной характеристик определяют пороговую точку.

Пороговая точка может быть определена как точка пересечения прямой, проходящей через рабочие точки 1 и 4, с передаточной характеристикой. На передаточной характеристике можно выделить точки с единичным усилением (точки 2 и 3, в этих точках коэффициент усиления  $K = -1$ ), а также четыре участка, соответствующие четырем возможным режимам работы элемента.

Участок 1 характеризуется условием  $U_{\text{вх}}^0 \leq U_{\text{вх}} \leq U_{\text{вх.пор}}^0$  и соответствует устойчивым установившимся значениям выходных напряжений: для прямого выхода  $y_2$  уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^0 \leq U_{\text{вых}} \leq U_{\text{вых.пор}}^0$  и для инверсного выхода  $y_1$  уровень напряжения  $U_{\text{вых.пор}}^1 \leq U_{\text{вых}} \leq U_{\text{вых}}^1$ . На данном участке транзисторы Т1–Т3 закрыты, а транзистор Т4 – открыт.

Участок 2 характеризуется условием  $U_{\text{вх.пор}}^0 \leq U_{\text{вх}} \leq U_{\text{вх.пор}}^1$  переключения из «1» в «0» для инверсного выхода, т. е. выхода  $y_1$ , и из «0» в «1» для прямого выхода, т. е. выхода  $y_2$ . На выходе элемента на уча-

стке 2 имеет место для прямого выхода  $u_2$  уровень напряжения  $U_{\text{вых.пор}}^0 \leq U_{\text{вых}} \leq U_{\text{вых.пор}}^1$ ; для инверсного выхода  $u_1$  – уровень напряжения  $U_{\text{вых.пор}}^0 \leq U_{\text{вых}} \leq U_{\text{вых.пор}}^1$ .

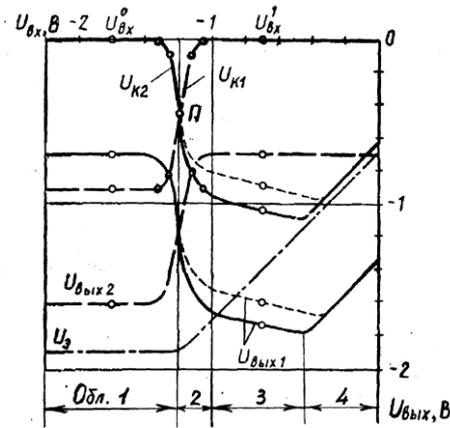


Рис. 3.5. Передаточная характеристика элемента ЭСЛ

Участок 3 характеризуется условием  $U_{\text{вх.пор}}^1 \geq U_{\text{вх}} \leq U_{\text{вх}}^1$ . На входе элемента будет «0» для инверсного выхода и «1» – для прямого выхода. На выходе элемента в этой области имеет место для инверсного выхода  $u_1$  уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^0 \leq U_{\text{вых}} \leq U_{\text{вых.пор}}^0$ ; для прямого выхода  $u_2$  – уровень напряжения  $U_{\text{вых.пор}}^1 \leq U_{\text{вых}} \leq U_{\text{вых}}^1$ . На этом участке у инверсной характеристики имеет место некоторый наклон вследствие неидеальности генератора тока токового переключателя.

Участок 4 характеризуется условием  $U_{\text{вх}}^1 \leq U_{\text{вх}}$  и является областью насыщения для инверсного плеча токового переключателя. Режим работы элемента на данном участке недопустим.

### Выходная характеристика

Выходная характеристика  $I_{\text{вых}} = f(U_{\text{вых}})$ , где  $I_{\text{вых}}$ ,  $U_{\text{вых}}$  – соответственно ток и напряжение на выходе схемы.

В некоторых случаях целесообразно рассматривать выходную характеристику в виде  $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{вых}})$ , где  $U_{\text{вых}}$ ,  $I_{\text{вых}}$  – выходное напряжение и ток соответственно.

Для снятия выходной характеристики используем схему, показанную на рис. 3.3, применительно к положительной логике. Характеристику будем снимать для двух состояний элемента (на выходе имеют место уровни напряжения  $U_{\text{вых}}^1$  и  $U_{\text{вых}}^0$ , изменяя ток  $I_{\text{вых}}$  и замеряя напряжение на выходе.

Методику снятия выходной характеристики рассмотрим применительно к инверсному выходу элемента, т. е.  $u_1$  для двух случаев.

**Случай 1.** Элемент выключен, т. е. на выходе  $u_1$  – уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^1$ . Для этого на входы  $x_1-x_3$  подаем уровень напряжения  $U_{\text{вх}}^0$ ; транзисторы Т1–Т3 закрыты и на выходе  $u_1$  будет напряжение  $U_{\text{вых}}^1$ , на выходе  $u_2$  – напряжение  $U_{\text{вых}}^0$ .

В процессе снятия выходной характеристики подключаем внешний регулируемый источник тока в точку  $u_1$ . Между точками А и В включаем миллиамперметр для измерения тока  $I_{\text{вых}}$ . Ток, выходящий из элемента, считаем отрицательным. Изменяя ток на выходе и измеряя напряжение  $U_{\text{вых}}$ , получим выходную характеристику в виде  $U_{\text{вых}}=f(I_{\text{вых}})$ .

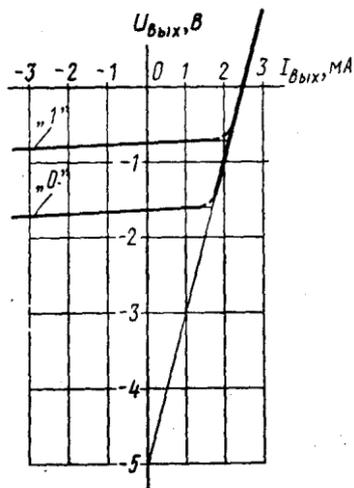


Рис. 3.6. Выходная характеристика элемента ЭСЛ

На рис. 3.6 приведены выходные характеристики для двух состояний элемента: элемент выключен – «1», элемент включен – «0». Для случая 1, когда на выходе элемента  $u_1$  имеет место напряжение  $U_{\text{вых}}^1$ , справедливы следующие соотношения:  $U_A = U_{\text{вых}1} + U_{\text{эбТ}_6}$ . Принимаем  $U_{\text{вых}1} = U_{\text{вых}}$ .

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{н1}} = I_{\text{эТ}_6} - I_{\text{Р}_6},$$

$$I_{\text{эТ}_6} = (+\beta) \overline{I_{\text{бТ}_6}} = (+\beta) \overline{\left( \frac{-U_A}{R_1} \right)} = -(+\beta) \overline{\left( \frac{U_{\text{вых}} + U_{\text{эбТ}_6}}{R_1} \right)}; \quad (3.37)$$

$$I_{\text{Р}_6} = \overline{\left( U_{\text{вых}} - U_{\text{ип}} \right)} R_6. \quad (3.38)$$

Тогда

$$I_{\text{ВЫХ}} = -\left(\beta + 1\right) U_{\text{ВЫХ}} + U_{\text{ЭБТ}_6} \left( R_1 - U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ИП}} \right) / R_6. \quad (3.39)$$

После преобразования (3.39) для  $I_{\text{ВЫХ}} = 0$  получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{-\left(\beta + 1\right) U_{\text{ЭБТ}_6} R_6 + U_{\text{ИП}} R_1}{\left(\beta + 1\right) R_6 + R_1}. \quad (3.40)$$

Выходное сопротивление элемента для случая 1

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_1 R_6 / \left(\beta + 1\right)}{R_1 / \left(\beta + 1\right) + R_6}. \quad (3.41)$$

После подстановки в (3.40), (3.41) исходных данных  $\beta = 30$ ;  $U_{\text{ЭБТ}_6} = 0,7 \text{ В}$ ;  $R_1 = 0,25 \text{ кОм}$ ;  $R_6 = 1,1 \text{ кОм}$  получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}1} = U_{\text{ВЫХ}}^1 = -0,74 \text{ В},$$

$$R_{\text{ВЫХ}} = 70 \text{ Ом}.$$

Выражение (3.39) есть уравнение прямой, проходящей через точку  $I_{\text{ВЫХ}} = 0$ ;  $U_{\text{ВЫХ}} = -0,74 \text{ В}$  (см. рис. 3.6 для «1»).

При  $U_{\text{ВЫХ}} = -0,7 \text{ В}$  транзистор  $T_6$ , закрыт, а ток  $I_{\text{ВЫХ}}$  связан с  $U_{\text{ВЫХ}}$  соотношением

$$I_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{ИП}} / R_6. \quad (3.42)$$

Выражение (3.42) есть уравнение прямой, проходящей через точки  $U_{\text{ВЫХ}} = -5 \text{ В}$  (при  $I_{\text{ВЫХ}} = 0$ ) и  $I_{\text{ВЫХ} \text{ max}} = -U_{\text{ИП}} / R_6 = 4,17 \text{ мА}$  (при  $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ ).

Таким образом, выходная характеристика для состояния выхода «1» имеет два участка. Из совместного решения уравнений (3.39) и (3.42) получим  $I_{\text{ВЫХ}}$  на границе этих двух участков:

$$I_{\text{ВЫХ}} = I_{\text{ВЫХ,гр}}^1 = -U_{\text{ИП}} + U_{\text{ЭБТ}_6} \left( R_6 + 2R_1 / \left(\beta + 1\right) \right). \quad (3.43)$$

Подставив числовые значения, найдем  $I_{\text{ВЫХ}} = 3,5 \text{ мА}$ .

Реальная выходная характеристика показана на рис. 3.6 пунктиром.

**Случай 2.** Элемент включен, т. е. на выходе  $u_1$  напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}^0$ . Для этого на один вход, например на вход  $x_1$ , подается уровень напряжения  $U_{\text{ВХ}}^1$ , а на объединенные входы  $x_2, x_3$  – уровень напряжения  $U_{\text{ВХ}}^0$ ; транзистор  $T_1$  открыт а транзисторы  $T_2$  и  $T_3$  закрыты. На выходе  $u_1$  будет уровень напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}^0$ , а на выходе  $u_2$  – уровень напряжения  $U_{\text{ВЫХ}}^1$ .

Для случая 2, когда на выходе элемента  $u_1$  имеет место уровень напряжения  $U_{\text{вых}}^0$ , справедливы следующие соотношения:

$$I_{\text{бТ6}} = I_{\text{R1}} - \alpha I_{\text{R3}} = -U_{\text{вых}} + U_{\text{бэТ6}} \overline{R_1} - \alpha I_{\text{R3}}; \quad (3.44)$$

$$I_{\text{эТ6}} = (\alpha + \beta) I_{\text{бТ6}}. \quad (3.45)$$

После подстановки (3.44) в (3.45) и необходимых преобразований получим

$$I_{\text{эТ6}} = -(\alpha + \beta) U_{\text{вых}} + U_{\text{бэТ6}} \overline{R_1} - \beta I_{\text{R3}}. \quad (3.46)$$

Учитывая (3.37) и (3.38), можно записать

$$I_{\text{вых}} = -(\alpha + \beta) U_{\text{вых}} + U_{\text{бэТ6}} \overline{R_1} - \beta I_{\text{R3}} - U_{\text{вых}} - U_{\text{ип}} \overline{R_6}. \quad (3.47)$$

После преобразований (3.47) определим при условии  $I_{\text{вых}} = 0$  выражение для выходного напряжения:

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{ип}} R_1 - (\alpha + \beta) U_{\text{бэТ6}} - \beta I_{\text{R3}} R_1 R_6}{R_1 + (\alpha + \beta) R_6}, \quad (3.48)$$

где

$$I_{\text{R3}} = (U_{\text{вх}}^1 - U_{\text{бэТ1}} - U_{\text{ип}}) \overline{R_3}. \quad (3.49)$$

Подставив в (3.48) и (3.49) исходные данные  $U_{\text{вх}}^1 = -0,825$  В;  $U_{\text{бэТ1}} = 0,7$  В;  $U_{\text{ип}} = -5$  В;  $R_3 = 1,1$  кОм;  $R_1 = 0,25$  кОм;  $R_6 = 1,1$  кОм;  $\beta = 30$ ;  $U_{\text{бэТ6}} = 0,7$  В, получим  $I_{\text{R3}} = 2,9$  мА;  $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых1}} = U_{\text{вых}}^0 = -1,6$  В.

Выходное сопротивление элемента для случая 2 определяется выражением (3.41). Выражение (3.48) есть уравнение прямой, проходящей через точку  $I_{\text{вых}} = 0$ ;  $U_{\text{вых}} = -1,6$  В (см. рис. 3.6, для «0»).

При  $U_{\text{вых}} > -(\alpha I_{\text{R3}} R_1) + U_{\text{бэТ6}} = -1,7$  В транзистор Т6 закрыт, а  $I_{\text{вых}}$  связан с  $U_{\text{вых}}$  соотношением (3.47).

Решая совместно уравнения (3.47) и (3.42), определим  $I_{\text{вых}}$  на границе двух участков выходной характеристики:

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{вых.гр}}^0 = -\frac{(U_{\text{ип}} + U_{\text{бэТ6}} + \alpha I_{\text{R3}} R_1)}{R_6 + 2R_1 / (\alpha + \beta)}. \quad (3.50)$$

Подставив числовые значения, получим  $I_{\text{вых.гр}}^0 = 2,17$  мА.

Если резистор R6(R5) в схеме не используется, то выходное сопротивление элемента

$$R_{\text{вых}} = R_1 / (\alpha + \beta) \quad (3.51)$$

Если резисторы R6(R5) в схеме элемента не используются при  $U_{\text{вых}} > -0,8$  В (для схемы с состоянием «1» на выходе) и  $U_{\text{вых}} > -1,6$  В (для

схемы с состоянием «0» на выходе), то транзистор Т6 закрыт, поэтому выходной ток равен нулю, а характеристика  $U_{\text{вых}}=f(I_{\text{вых}})$  деформируется (см. пункт на рис. 3.6).

### 3.3. Расчет динамических параметров элемента ЭСЛ

Исходные данные те же, что и для расчета статических характеристик.

К основным динамическим параметрам относятся:

– время перехода из состояния логической «1» в состояние логического «0» –  $t^{1,0}$ ;

– время перехода из состояния логического «0» в состояние логической «1» –  $t^{0,1}$ ;

– время задержки включения –  $t_{\text{зд}}^{1,0}$ ;

– время задержки выключения –  $t_{\text{зд}}^{0,1}$ ;

– время задержки распространения при включении –  $t_{\text{зд.р}}^{1,0}$ ;

– время задержки распространения при выключении –  $t_{\text{зд.р}}^{0,1}$ ;

– среднее время задержки распространения сигнала –  $t_{\text{зд.р.ср}}$ ;

– работа переключения –  $A_{\text{пер}}$ ;

– динамическая мощность –  $P_{\text{дин}}$ .

Собственное время переключения тока в транзисторе:

$$\tau_T = 1/(2\pi f_T), \quad (3.52)$$

где  $f_T$  – граничная частота усиления транзистора (задается в исходных данных).

$$\tau_T = 1/(2\pi \cdot 800 \cdot 10^6) = 0,2 \text{ нс}.$$

Емкость на выходе транзистора Т6:

$$C_2 = C_n + C_{\text{п1}}, \quad (3.53)$$

где  $C_n$  – емкость нагрузки (заданная в исходных данных);

$C_{\text{п2}}$  – паразитная емкость изоляции резистора R6 и металлических соединений, подключенных к выходу схемы.

Принимаем  $C_{\text{п2}} = 2$  пФ;  $C_2 = 30 + 2 = 32$  пФ.

Эквивалентная емкость на коллекторах транзисторов Т1–Т2:

$$C_1 = (1+K)C_K + C_{\text{п1}} + C_2 / (1+K), \quad (3.54)$$

где  $M$  – количество транзисторов, определяющих  $C_1$  (Т1–Т3, Т6);  
 $C_K$  – емкость коллекторных переходов транзисторов Т1–Т3, Т6;  
 $C_{п1}$  – паразитная емкость металлических соединений и изоляции транзисторов Т1–Т3 и резистора R1;  
 $\beta$  – статическое значение коэффициента усиления транзистора Т6 (задается в исходных данных).

Для рассчитываемой схемы  $M = 4$ .

Принимаем  $C_K = 2$  пФ;  $C_{п1} = 1$  пФ.

Определяем:

$$C_1 = (4 + 1) \cdot 2 + 1 + 32 \cdot (30 + 1) = 12 \text{ пФ} .$$

Постоянная времени заряда конденсатора  $C_1$ :

$$\tau_K = R_1 C_1 , \quad (3.55)$$

$$\tau_K = 0,365 \cdot 10^3 \cdot 12 \cdot 10^{-12} = 4,38 \text{ нс} .$$

Постоянная времени спада:

$$\tau_c = R_6 C_2 , \quad (3.56)$$

$$\tau_c = 1,2 \cdot 10^3 \cdot 32 \cdot 10^{-12} = 38,4 \text{ нс} .$$

Время спада:

$$t_c = \tau_c \cdot 0,5 U_{л} / (U_{ин} - U^* ) , \quad (3.57)$$

$$t_c = 38,4 \cdot 10^{-9} \cdot 0,5 \cdot 0,8 / (-0,7) \approx 3,5 \text{ нс} .$$

Время нарастания:

$$t_{нар} = \tau_K \ln 2 , \quad (3.58)$$

$$t_{нар} = 4,38 \ln 2 = 3 \text{ нс} .$$

Задержка распространения при включении:

$$t_{зд,р}^{1,0} = 2\tau_T + t_c , \quad (3.59)$$

$$t_{зд,р}^{1,0} = 2 \cdot 0,2 + 3,5 = 3,9 \text{ нс} .$$

Задержка распространения при включении:

$$t_{зд,р}^{0,1} = 2\tau_T + t_{нар} , \quad (3.60)$$

$$t_{з.д.р}^{0,1} = 2 \cdot 0,2 + 3 = 3,4 \text{ нс} .$$

Средняя задержка распространения:

$$t_{з.д.р.ср} = \sqrt{t_{з.д.р}^{1,0} + t_{з.д.р}^{0,1}} / 2 , \quad (3.61)$$

$$t_{з.д.р.ср} = \sqrt{4,9 + 3,4} / 2 = 3,65 \text{ нс} .$$

Время перехода из состояния «1» в состояние «0»:

$$t^{1,0} = 2t_c , \quad (3.62)$$

$$t^{1,0} = 2 \cdot 3,5 = 7 \text{ нс} .$$

Время перехода из состояния «0» в состояние «1»:

$$t^{0,1} = 2t_{нар} , \quad (3.63)$$

$$t^{0,1} = 2 \cdot 3 = 6 \text{ нс} .$$

Время задержки включения:

$$t_{з.д}^{1,0} = 0,5t_{вх}^{0,1} + 2\Delta t , \quad (3.64)$$

где  $t_{вх}^{0,1}$  – время перехода из состояния «0» в состояние «1» для входного сигнала (задается в исходных данных);  $\Delta t$  – время закрывания транзистора Т4 ( $\Delta t \approx \tau_T$ );

$$t_{з.д}^{1,0} = 0,5 \cdot 3 + 2 \cdot 0,2 = 1,9 \text{ нс} .$$

Время задержки выключения:

$$t_{з.д}^{0,1} = 0,5t_{вх}^{1,0} + 2\Delta t , \quad (3.65)$$

где  $t_{вх}^{1,0}$  – время перехода из состояния «1» в состояние «0» для входного сигнала (задается в исходных данных);

$$t_{з.д}^{0,1} = 0,5 \cdot 2 + 2 \cdot 0,2 = 1,4 \text{ нс} .$$

Работа переключения элемента:

$$A_{пер} = P_{п.ср} t_{з.д.р.ср} , \quad (3.66)$$

$$A_{\text{пер}} = 80 \cdot 10^{-3} \cdot 3,65 \cdot 10^{-9} = 292 \text{ пДж} .$$

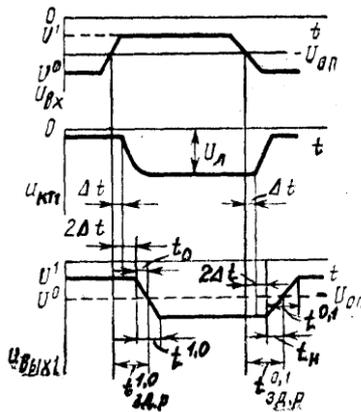


Рис. 3.7. Эпюры переходного процесса в элементе ЭСЛ

По результатам расчета динамических характеристик строятся эпюры переходного процесса в элементе ЭСЛ.

## 4. РАСЧЕТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УРОВНЕЙ ЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

### 4.1. Общие сведения о преобразователях уровней

Преобразователями уровней (адаптерами, драйверами, трансляторами) называют специальные элементы цифровых устройств, предназначенные для обеспечения совместимости логических уровней различных семейств цифровой логики, а также для обеспечения сопряжения логических устройств с объектами управления, датчиками, устройствами индикации, документирования и т.д.

Кроме обеспечения совместимости уровней сигналов преобразователи должны удовлетворять специальным требованиям, например таким, как сохранение преобразователем порогового уровня управляющего элемента, уровней токов, способа кодирования двоичных переменных, обеспечение заданных требований по нагрузочной способности и параметрам быстродействия.

Ввиду большого числа схем рассмотреть все возможные варианты преобразователей уровня не представляется возможным. Сформулируем некоторые общие правила их построения для большинства случаев:

– преобразователи уровней проектируются для конкретных схем с обязательным учетом выходных характеристик и параметров управляющего элемента и входных характеристик и параметров управляемого элемента;

– перепад логических уровней управляющего элемента должен быть достаточным для надежного функционирования преобразователя уровней;

– преобразователь уровней должен обеспечивать необходимые динамические параметры с учетом реактивной составляющей сопротивления нагрузок.

В составе схем малой и средней степени интеграции ТТЛ, ЭСЛ и КМДП имеются специально разработанные преобразователи уровней, которые позволяют соединять перечисленные микросхемы между собой. Однако в ряде случаев возникает необходимость согласования нестандартного источника сигнала или нагрузки с серийными микросхемами. Для этого можно воспользоваться одной из следующих схем: делители напряжения; фиксаторы уровней; сдвигатели уровней; ключевые транзисторные схемы; схемы, работающие на принципе переключения тока; трансформаторные схемы.

Рассмотрим примеры расчета некоторых из перечисленных схем.

## 4.2. Схема управления исполнительным устройством от элемента ТТЛ-типа

Требуется обеспечить управление исполнительным устройством, срабатывающим от напряжения  $U_{\text{ип}} = 27 \text{ В}$  и имеющим входное сопротивление  $R_{\text{вх иу}} = 1 \text{ кОм}$  при управлении от элементов ТТЛ-типа.

Вариант схемы данного преобразователя уровней приведен на рис. 4.1. Устройство представляет собой ключевую схему с комбинацией транзисторов n-p-n и p-p-p типов. Считаем, что оба транзистора кремниевые.

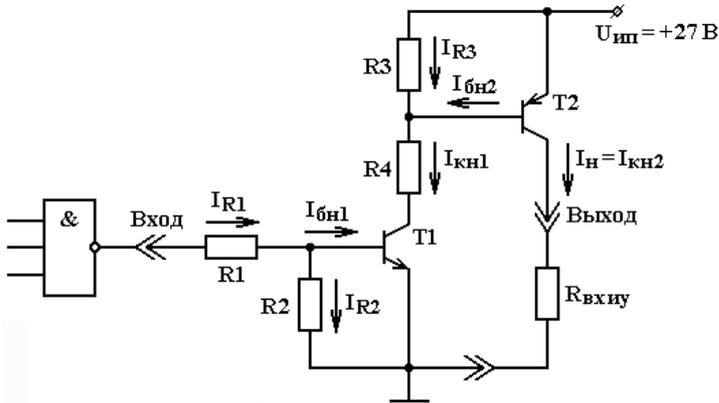


Рис. 4.1. Схема преобразователя уровней элемента ТТЛ-типа в высокий уровень

Схема работает следующим образом. При уровне «0» на выходе управляющего элемента ТТЛ-типа оба транзистора закрыты, ток, протекающий через входное сопротивление исполнительного устройства, очень мал (обратный коллекторный ток закрытого транзистора T2), т.е. на вход исполнительного устройства подается сигнал с уровнем «0». При уровне «1» на выходе элемента ТТЛ-типа оба транзистора открыты и насыщены, на входном сопротивлении исполнительного устройства выделяется напряжение, приблизительно равное напряжению питания, т.е. подается сигнал с уровнем «1». Для тока нагрузки

$$I_{\text{н}} = I_{\text{кн}2},$$

где  $I_{\text{кн}2}$  – коллекторный ток насыщения транзистора T2, можно записать:

$$I_{\text{н}} = I_{\text{кн}2} = \frac{U_{\text{ип}} - U_{\text{кн}2}}{R_{\text{вх иу}}}. \quad (4.1)$$

Если считать, что  $U_{кЭН2} = 0,3 \text{ В}$ , то из (4.1):

$$I_H = I_{кН2} = (27 - 0,3) / 1 \cdot 10^3 = 26,7 \text{ мА} .$$

Пусть у выбранного типа транзистора Т2 минимальное значение коэффициента усиления по току  $\beta_{\min} = 20$ , тогда, принимая коэффициент насыщения транзистора Т2  $K_{\text{нас}} = 1,5$ , найдем значение тока базы:

$$I_{\text{бН2}} = I_{кН2} \cdot K_{\text{нас}} / \beta_{\min} , \quad (4.2)$$

$$I_{\text{бН2}} = 26,7 \cdot 1,5 / 20 = 2 \text{ мА} .$$

Значение тока  $I_{R3}$  через резистор R3, шунтирующий переход база-эмиттер транзистора Т2 и удерживающий этот транзистор в закрытом состоянии (когда на выходе управляющего элемента ТТЛ-типа уровень «0»), выбирается в пределах  $5 \div 20$  % от тока базы насыщенного транзистора Т2. Пусть

$$I_{R3} = 0,1 \cdot I_{\text{бН2}} ,$$

$$I_{R3} = 0,1 \cdot 2 = 0,2 \text{ мА} .$$

Так как транзистор Т2 насыщен, то между выводами базы и эмиттера действует напряжение  $U_{\text{бЭН2}}$ . Эта величина указывается в справочниках для определенного режима, ориентировочно она лежит в пределах  $0,7 \div 1,0 \text{ В}$ . Принимаем  $U_{\text{бЭН2}} = 0,75 \text{ В}$ , находим сопротивление:

$$R_3 = U_{\text{бЭН2}} / I_{R3} ,$$

$$R_3 = 0,75 / 0,2 = 3,75 \text{ кОм} .$$

Округляем значение резистора R3 до ближайшего меньшего стандартного номинального значения. Номинальное значение выбирается из ряда E24 выпускаемых промышленностью резисторов. Значения коэффициентов ряда E24 приведены в табл. 4.1.

Номинальные значения сопротивлений резисторов должны соответствовать коэффициентам соответствующего ряда, или числам, полученным уменьшением или делением этих чисел на  $10^n$ , где n – целое положительное или отрицательное число.

В соответствии с вышеизложенным  $R_3 = 3,6 \text{ кОм}$ .

Очевидно, что

$$I_{кН1} = I_{\text{бН2}} + I_{R3} ,$$

$$I_{кН1} = 2 + 0,2 = 2,2 \text{ мА} .$$

Таблица 4.1

## Номинальные сопротивления по ряду E6, E12, E24

E6	E12	E24	E6	E12	E24	E6	E12	E24
1,0	1,0	1,0	2,2	2,2	2,2	4,7	4,7	4,7
1,5	1,2	1,1	3,3	2,7	2,4	6,8	5,6	5,1
	1,5	1,2		3,3	2,7		6,8	5,6
	1,8	1,3		3,9	3,0		8,2	6,2
		1,5			3,3			6,8
		1,6			3,6			7,5
		1,8			3,9			8,2
		2,0			4,3			9,1

Так как транзистор Т1 насыщен, то можно определить сопротивление R4:

$$R_4 = \frac{U_{ин} - U_{бэп2} - U_{кэп1}}{I_{кп1}}, \quad (4.3)$$

$$R_4 = \frac{7 - 0,75 - 0,3}{2,2} = 11,8 \text{ кОм}.$$

Округляем значение R4 до ближайшего меньшего стандартного номинального значения:  $R_4 = 11 \text{ кОм}$ .

Приняв для транзистора Т1  $\beta_{\min} = 20$  и  $K_{\text{нас}} = 1,5$ , определяем ток базы насыщенного транзистора Т1:

$$I_{бп1} = I_{кп1} \cdot K_{\text{нас}} / \beta_{\min}, \quad (4.4)$$

$$I_{бп1} = 2,2 \cdot 1,5 / 20 = 0,165 \text{ мА}.$$

Приняв  $I_{R2} = 0,1 \cdot I_{бп1} = 0,1 \cdot 0,165 = 0,0165 \text{ мА}$ , а  $U_{бэп1} = 0,75 \text{ В}$ , найдем сопротивление R2:

$$R_2 = U_{бэп1} / I_{R2},$$

$$R_2 = 0,75 / 0,0165 = 45,4 \text{ кОм}.$$

Округляем значение R2 до ближайшего меньшего стандартного номинального значения,  $R_2 = 43 \text{ кОм}$ .

Поскольку значение R2 довольно большое, необходимо проверить условие надежного запираания транзистора Т1 при отключенном управляющем элементе (предполагаем, что связь осуществляется через разъемное соединение). Это условие записывается в виде:

$$I_{кб0} R_2 < U_{бэ0}, \quad (4.5)$$

где  $I_{к60}$  – обратный тепловой ток коллекторного перехода;  $U_{630}$  – напряжение на переходе база-эмиттер, при котором транзистор начинает открываться.

Принимаем  $I_{к60} = 8 \text{ мкА}$  ,  $U_{630} = 0,5 \text{ В}$  .

По формуле (4.5)

$$8 \cdot 10^{-6} \cdot 43 \cdot 10^3 = 0,344 \text{ В} < 0,5 \text{ В} .$$

При таком напряжении на переходе база-эмиттер транзистор Т1 надежно закрыт.

Уточняем значение тока  $I_{R2}$ :

$$I_{R2} = 0,75 / 43 \cdot 10^{-3} = 0,017 \text{ мА} .$$

Определяем ток через резистор R1:

$$I_{R1} = I_{631} + I_{R2} ,$$

$$I_{R1} = 0,165 + 0,017 = 0,1824 \text{ мА} .$$

Заменив выходную цепь закрытого элемента ТТЛ-типа эквивалентной ЭДС  $E_{ТТЛ} = 3,6 \text{ В}$  с выходным сопротивлением  $R_{ТТЛ} = 100 \text{ Ом}$

$$R_1 = \frac{E_{ТТЛ} - U_{631}}{I_{R1}} - R_{ТТЛ} ,$$

вычислим R1:

$$R_1 = \frac{3,6 - 0,75}{0,1824 \cdot 10^{-3}} - 100 = 15,525 \text{ кОм} .$$

Округляем значение R1 до ближайшего меньшего стандартного номинального значения,  $R_1 = 15 \text{ кОм}$  .

Напряжение на выходе управляющего элемента:

$$U_{\text{вых}} = E_{ТТЛ} - I_{R1} R_{ТТЛ} ,$$

$$U_{\text{вых}} = 3,6 - 0,1824 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 3,58 \text{ В} .$$

Это говорит о том, что управляющий ТТЛ-элемент может работать не только на преобразователь уровней, но и на другие элементы ТТЛ-типа.

### 4.3. Схема управления исполнительным устройством от элемента ЭСЛ-типа

Требуется обеспечить управление исполнительным устройством, срабатывающим от напряжения  $U_{\text{инп}} = -12 \text{ В}$  и имеющим входное сопротивление  $R_{\text{вх иу}} = 1 \text{ кОм}$  при управлении от элемента ЭСЛ-типа с  $U_{\text{вых}}^0 = -1,7 \text{ В}$  и  $U_{\text{вых}}^1 = -0,9 \text{ В}$ .

Вариант схемы данного преобразователя уровней приведен на рис. 4.2. Схема работает на принципе переключения тока и используется в тех случаях, когда логический перепад уровней сигнала может составлять доли вольт.

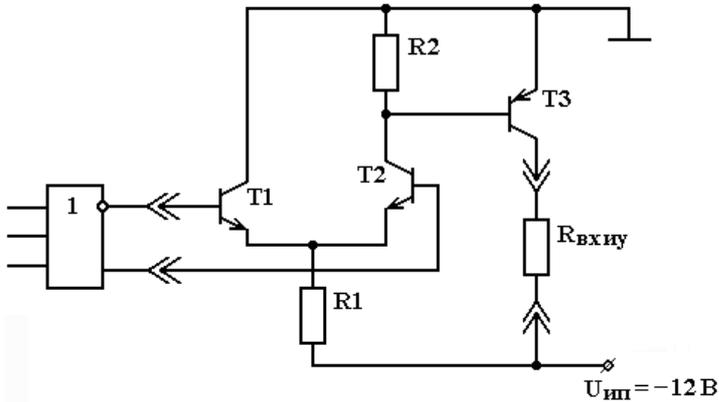


Рис. 4.2. Схема преобразователя уровней элемента ЭСЛ-типа в высокий уровень

При уровне «0» на неинвертирующем выходе управляющего элемента ЭСЛ-типа транзистор T2 закрыт, а транзистор T1 открыт высоким уровнем, соответствующим логической «1» с инвертирующего выхода. Потенциал базы транзистора T3 высокий, следовательно, транзистор T3 закрыт, ток через входное сопротивление исполнительного устройства не протекает, т.е. подается логический сигнал с уровнем «0».

При уровне «1» на неинвертирующем выходе управляющего элемента транзистор T2 открывается, а транзистор T1 закрывается низким уровнем, соответствующим логическому «0» с инвертирующего выхода. Потенциал коллектора транзистора T2, а следовательно, и базы транзистора T3 уменьшается. Транзистор T3 открывается, на входном сопротивлении исполнительного устройства выделяется напряжение прибли-

зительно равному напряжению питания, то есть подается логический сигнал с уровнем «1».

Для тока нагрузки:

$$I_H = I_{кн3},$$

где  $I_{кн3}$  – коллекторный ток насыщения транзистора Т3, можно записать:

$$I_H = I_{кн3} = (U_{ип} - U_{кэп3}) / R_{вх\text{ иу}}. \quad (4.6)$$

Если считать, что  $U_{кэп3} \approx 0,3 \text{ В}$ , то из (4.6):

$$I_H = I_{кн3} = (12 - 0,3) / 1 \cdot 10^3 = 11,7 \text{ мА}.$$

Пусть у выбранного типа транзистора минимальное значение коэффициента усиления по току  $\beta_{\min} = 20$ , тогда, принимая коэффициент насыщения транзистора Т3  $K_{нас} = 1,5$ , найдем значение тока базы:

$$I_{бн3} = I_{кн3} \cdot K_{нас} / \beta_{\min},$$

$$I_{бн3} = 11,7 \cdot 1,5 / 20 = 0,88 \text{ мА}.$$

Примем  $I_{R3} = 0,88 \text{ мА}$ , тогда

$$R_2 = U_{бэп3} / I_{R2},$$

$$R_2 = 0,7 / 0,88 = 0,795 \text{ кОм}.$$

В соответствии с табл. 4.1 округляем значение R2 до ближайшего меньшего стандартного номинального значения,  $R_2 = 0,75 \text{ кОм}$ .

Уточняем величину тока  $I_{R2}$ :

$$I_{R2} = U_{бэп3} / R_2,$$

$$I_{R2} = 0,7 / 0,75 \cdot 10^3 = 0,93 \text{ мА}.$$

Переключаемый ток коллектора транзистора Т2:

$$I_{кТ2} = I_{R2} + I_{бн3},$$

$$I_{R2} = 0,93 + 0,88 = 1,81 \text{ мА}.$$

Определим R1:

$$R_1 = (U_{ип} - U_{эбТ2} - U_{вых}^1) / (+\beta_{\min}) I_{кТ2} / \beta,$$

$$R_1 = (12 - (0,7) - (0,9)) / (+20) \cdot 1,81 / 20 = 5,47 \text{ кОм}.$$

В соответствии с табл. 4.1 округляем значение  $R1$  до ближайшего меньшего стандартного номинального значения,  $R1 = 5,1 \text{ кОм}$ .

#### 4.4. Схема преобразования уровней управляющего устройства в уровни элементов ТТЛ-типа

Требуется разработать преобразователь уровней  $U^0 = 0 \text{ В}$  и  $U^1 = -6 \text{ В}$  в уровни элементов ТТЛ-типа, причем к выходу преобразователя должно подключаться 10 элементов ТТЛ-типа. Известно, что на выходе управляющего элемента стоит простой инвертор на транзисторе р-п-р-типа, в коллекторе которого включен резистор  $1 \text{ кОм}$ , а питание  $U_{\text{ип}1} = -6 \text{ В}$ . Транзистор работает или в режиме насыщения, или в режиме отсечки. Схема такого преобразователя уровней приведена на рис. 4.3.

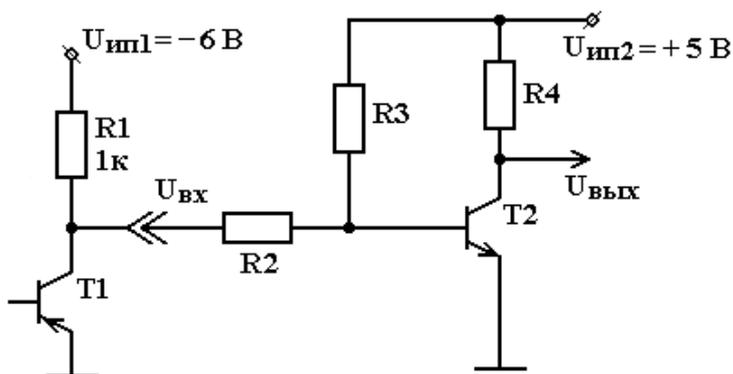


Рис. 4.3. Схема преобразователя уровней в уровни элементов ТТЛ-типа

Схема работает следующим образом. Когда транзистор  $T1$  находится в режиме отсечки, параметры схемы обеспечивают такой же режим для транзистора  $T2$ . В этом случае на выходе действует высокий потенциал, или уровень логической «1». Когда транзистор  $T1$  насыщен, параметры схемы обеспечивают такой же режим и для транзистора  $T2$ . На выходе схемы действует низкий потенциал, или уровень логического «0».

Минимальное значение сопротивления  $R4$  определяется исходя из допустимого тока коллектора  $I_{\text{к доп}}$  транзистора  $T2$ . Пусть  $I_{\text{к доп}} = 20 \text{ мА}$ .

Тогда

$$I_{кнас2} = I_{R4} + K_{раз} I_{вх}^0. \quad (4.7)$$

Заменяя в (4.7)  $I_{кнас2}$  на  $I_{кдоп}$  и подставляя значение  $K_{раз} = 10$ ,  $I_{вх}^0 = 1,6 \text{ мА}$ , найдем:

$$I_{R4max} = I_{кдоп} - K_{раз} I_{вх}^0,$$

$$I_{R4max} = 20 - 10 \cdot 1,6 = 4 \text{ мА}.$$

Определяем:

$$R_{4min} = (U_{ип2} - U_{кэнас2}) / I_{R4max}, \quad (4.8)$$

$$R_{4min} = (5 - 0,3) / 4 \approx 1,17 \text{ кОм}.$$

Максимальное значение сопротивления  $R4$  определяется исходя из обеспечения допустимого уровня  $U_{вх}^1$  в наихудших условиях. Когда транзистор Т2 находится в режиме отсечки,

$$U_{вх}^1 = U_{ип2} - R_4 K_{раз} I_{вх}^1. \quad (4.9)$$

Определяем

$$R_{4max} = (U_{ип2} - U_{вх}^1) / (K_{раз} I_{вх}^1). \quad (4.10)$$

Подставляя значения  $I_{вх}^1 = 0,04 \text{ мА}$ ,  $U_{вх}^1 = 3,6 \text{ В}$ ,  $K_{раз} = 10$  в (4.10), получаем:

$$R_{4max} = (5 - 3,6) / (10 \cdot 0,04) = 3,5 \text{ кОм}.$$

Из табл. 4.1 выбираем наименьшее номинальное значение резистора  $R4$ , удовлетворяющее требованиям (4.8) и (4.10),  $R_4 = 1,2 \text{ кОм}$ .

Уточняем величину  $I_{кнас2}$ :

$$I_{кнас2} = (U_{ип2} - U_{кэнас2}) / R_4 + K_{раз} I_{вх}^0,$$

$$I_{кнас2} = (5 - 0,3) / 1,2 \cdot 10^3 + 10 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} = 20 \text{ мА}.$$

Приняв  $\beta = 20$  и  $K_{нас} = 1,5$  для транзистора Т2, найдем:

$$I_{бнас2} = K_{нас} I_{кнас2} / \beta,$$

$$I_{\text{б нас2}} = 1,5 \cdot 20/20 = 1,5 \text{ мА} .$$

Для токов  $I_{R3}$  и  $I_{R2}$  можно записать очевидные соотношения:

$$I_{R3} = (U_{\text{ип2}} - U_{\text{бэ нас2}}) / R_3 , \quad (4.11)$$

$$I_{R3} = (-0,7) / R_3 = 4,3/R_3 ;$$

$$I_{R2} = (U_{\text{бэ нас2}} - U_{\text{кэ нас1}}) / R_2 , \quad (4.12)$$

$$I_{R2} = (0,7 - (-0,3)) / R_2 = 1/R_2 ,$$

$$I_{\text{б нас2}} = I_{R3} - I_{R2} , \quad (4.13)$$

Из (4.13) получим первое уравнение, связывающее  $R_2$  и  $R_3$ :

$$4,3/R_3 - 1/R_2 = 1,5 \cdot 10^{-3} . \quad (4.14)$$

Рассмотрим режим, в котором оба транзистора находятся в режиме отсечки. Транзистор Т2 закрыт, если  $|U_{\text{закр}}| \geq |U_{\text{отс}}|$ , где  $U_{\text{отс}}$  – напряжение отсечки. Для кремниевого транзистора  $U_{\text{отс}} \approx 0,5 \text{ В}$ . Для надежного запираения транзистора Т2 принимаем  $U_{\text{закр}} = -0,1 \text{ В}$  и составляем второе уравнение для определения  $R_2$  и  $R_3$ :

$$U_{\text{б2}} = U_{\text{закр}} = U_{\text{ип2}} - (U_{\text{ип2}} - U_{\text{ип1}}) \cdot R_3 / (R_1 + R_2 + R_3) . \quad (4.15)$$

Приняв  $U_{\text{закр}} = -0,1 \text{ В}$  и подставив в выражение (4.15) числовые значения, после упрощения получим:

$$R_2 = 1,16R_3 - 10^3 . \quad (4.16)$$

Решая совместно (4.14) и (4.16) найдем, что  $R_2 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 1,74 \text{ кОм}$ .

Округляем значения  $R_2$  и  $R_3$  до ближайших номинальных значений резисторов в соответствии с табл. 4.1:  $R_2 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = 1,8 \text{ кОм}$ .

По (4.15) проверяем  $U_{\text{закр}}$  на базе транзистора Т2:

$$U_{\text{закр}} = 5 - (-0,6) \cdot 1,8 \cdot 10^3 / (10^3 + 10^3 + 1,8 \cdot 10^3) = -0,2 \text{ В} .$$

Таким образом, надежное запираение транзистора Т2 обеспечивается.

#### 4.5. Схема преобразования уровней управляющего устройства в уровни элементов ЭСЛ-типа

Требуется разработать преобразователь уровней  $U_{\text{ВХ}}^0 = 0 \text{ В}$  и  $U_{\text{ВХ}}^1 = 8 \text{ В}$  управляющего устройства в уровни элементов ЭСЛ-типа  $U_{\text{ВЫХ}}^0 = -1,7 \text{ В}$  и  $U_{\text{ВЫХ}}^1 = -0,9 \text{ В}$ . Схема такого преобразователя уровней приведена на рис. 4.4.

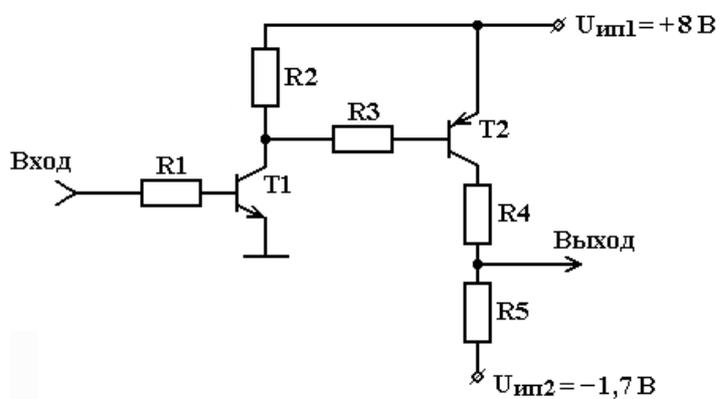


Рис. 4.4. Схема преобразования уровней управляющего устройства в уровни элементов ЭСЛ-типа

Схема работает следующим образом. При низком уровне логического сигнала на выходе управляющего устройства ( $U_{\text{ВХ}}^0 = 0 \text{ В}$ ) транзистор Т1 закрыт, потенциал коллектора высокий, следовательно, закрыт и транзистор Т2, на выход схемы поступает напряжение  $U_{\text{инт2}} = -1,7 \text{ В}$ , что соответствует  $U_{\text{ВХ}}^0$  сигнала ЭСЛ для положительной логики.

При высоком уровне логического сигнала ( $U_{\text{ВХ}}^1 = 8 \text{ В}$ ) транзистор Т1 открывается, потенциал его коллектора уменьшается, транзистор Т2 открывается, коллекторный ток транзистора Т2 создает падение напряжения на резисторе R5, плюсом приложенное к выходу. Потенциал выхода увеличивается до уровня  $U_{\text{ВЫХ}}^1 = -0,9 \text{ В}$ , что соответствует  $U_{\text{ВХ}}^1$  сигнала ЭСЛ для положительной логики.

Падение напряжения на резисторе R5 для  $U_{\text{вых}}^1 = -0,9 \text{ В}$  можно определить из соотношения

$$U_{R5} = U_{\text{вых}}^1 - U_{\text{ип}2},$$

$$U_{R5} = -0,9 - (-1,7) = 0,8 \text{ В}.$$

Падение напряжения на резисторе R4 для  $U_{\text{вых}}^1 = -0,9 \text{ В}$ :

$$U_{R4} = U_{\text{ип}1} - U_{\text{кэнас}2} - U_{\text{вых}}^1,$$

$$U_{R4} = 8 - 0,3 - (-0,9) = 8,6 \text{ В}.$$

Выбираем  $I_{\text{кнас}2} = 5 \text{ мА}$   $(I_{\text{кнас}2} \approx 5 \div 50 I_{\text{вхЭСЛ}})$  и определяем R4 и R5:

$$R_4 = U_{R4} / I_{\text{кнас}2},$$

$$R_4 = 8,6 / 5 = 1,72 \text{ кОм};$$

$$R_5 = U_{R5} / I_{\text{кнас}2},$$

$$R_5 = 0,8 / 5 = 0,16 \text{ кОм}.$$

В соответствии с табл. 4.1 округляем значения R4 и R5 до ближайшего меньшего номинального значения ряда E24:  $R_4 = 1,6 \text{ кОм}$ .

Принимаем у выбранного типа транзистора T2 минимальное значение коэффициента усиления по току  $\beta_{\text{min}} = 20$ , коэффициент насыщения  $K_{\text{нас}} = 1,5$ , найдем значение тока базы транзистора T2:

$$I_{\text{бнас}2} = I_{\text{кнас}2} \cdot K_{\text{нас}} / \beta_{\text{min}}, \quad (4.17)$$

$$I_{\text{бнас}2} = 5 \cdot 1,5 / 20 = 0,375 \text{ мА}.$$

Падение напряжения на резисторе R3:

$$U_{R3} = U_{\text{ип}1} - U_{\text{бэнас}2} - U_{\text{кэнас}1}.$$

Принимаем  $U_{\text{бэнас}2} = 0,7 \text{ В}$ ,  $U_{\text{кэнас}1} = 0,3 \text{ В}$ , тогда:

$$U_{R3} = 8 - 0,7 - 0,3 = 7 \text{ В}.$$

Определяем величину резистора R3:

$$R_3 = U_{R3} / I_{\text{бнас}2},$$

$$R_3 = 7 / 0,375 \cdot 10^{-3} = 18,7 \text{ кОм}.$$

В соответствии с табл. 4.1 округляем значение  $R_3$  до ближайшего меньшего номинального значения ряда У24:  $R_3 = 18 \text{ кОм}$ .

Выбираем  $I_{\text{кнас}2} = 5 \text{ мА}$  и определяем величину тока через резистор  $R_2$ :

$$I_{R2} = I_{\text{кнас}2} - I_{R3},$$

$$I_{R2} = 5 - 0,375 = 4,625 \text{ мА}.$$

Определяем величину сопротивления резистора  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{U_{\text{ип}1} - U_{\text{кэнас}1}}{I_{R2}}.$$

$$R_2 = \frac{6 - 0,3}{4,625} \cdot 10^{-3} = 1,58 \text{ кОм}.$$

Округляем  $R_2$  до ближайшего меньшего номинального значения ряда Е24:  $R_2 = 1,5 \text{ кОм}$ .

По формуле (4.17) ток базы насыщения транзистора  $T1$ :

$$I_{\text{бнас}1} = 5 \cdot 1,5 / 20 = 0,375 \text{ мА}.$$

Величина сопротивления резистора  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{U_{\text{вх}}^1 - U_{\text{бэнас}1}}{I_{\text{бнас}1}},$$

$$R_1 = \frac{6 - 0,7}{0,375} \cdot 10^{-3} = 19 \text{ кОм}.$$

Округляем  $R_1$  до ближайшего меньшего номинального значения ряда Е24:  $R_1 = 18 \text{ кОм}$ .

Рассчитанный преобразователь уровней удовлетворяет заданным требованиям при работе на элемент ЭСЛ с большим входным сопротивлением.

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соломатин Н.М. Логические элементы ЭВМ. – М.: Высш. шк., 1992.
2. Преснухин А.Н., Воробьев Н.В., Шинкевич А.А. Расчет элементов цифровых устройств. – М.: Высш. шк., 1991.
3. Завадский В.А. Компьютерная электроника. – Киев: ВЕК, 1996.
4. Новиков Ю.В. и др. Разработка устройств сопряжения для персонального компьютера типа IBM PC: Практическое пособие / Под общ. ред. Ю.В. Новикова. – М.: ЭКОМ, 1998.
5. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. – СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2000.
6. Партала О.Н. Цифровая электроника. – СПб.: Наука и техника, 2000.
7. Опачий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000.
8. Хоровиц П. Искусство схемотехники. – М.: Мир, 2001.
9. Пейтон А., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. – М.: БИНОМ, 1994.
10. Костиков В.Г. Источники электропитания электронных средств. – М.: Радио и связь, 1998.
11. Березин О.К. и др. Источники электропитания электронной аппаратуры. – М.: «Три Л», Горячая линия – Телеком, 2000.
12. Разработка и оформление конструкторской документации РЭА: Справочник / Под ред. Э.Т. Романычевой. – М.: Радио и связь, 1989.

# ПРИЛОЖЕНИЕ 1

## Образец задания на курсовую работу

Владивостокский государственный университет  
экономики и сервиса

Кафедра электроники

УТВЕРЖДАЮ  
Зав. кафедрой электроники  
\_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_ г.

### З А Д А Н И Е на курсовую работу по дисциплине «Расчет электронных устройств»

студенту \_\_\_\_ курса, группы \_\_\_\_\_ ИИТиТС ВГУЭиС  
фамилия \_\_\_\_\_ имя \_\_\_\_\_ отчество \_\_\_\_\_.  
Срок сдачи проекта « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2002 г.

#### 1. Тема работы:

Расчет элемента ТТЛ и преобразователя уровней логического  
сигнала

#### 2. Исходные данные к работе:

1. Напряжение источника питания  $U_{\text{ин}}$ , В
2. Коэффициент объединения по входу  $K_{\text{об.вх}}$
3. Коэффициент разветвления  $K_{\text{раз}}$
4. Коэффициент насыщения транзисторов  $T_1 - T_4 - K_{\text{нас}}$
5. Коэффициент усиления транзисторов  $T_1 - T_4 - \beta$
6. Инверсный коэффициент усиления МЭТ,  $B_i$
7. Емкость нагрузки –  $C_n$ , пФ
8. Средняя мощность, потребляемая элементом в  
статическом режиме,  $P_{\text{п.ср}}$ , мВт
9. Уровень напряжения  $U_{\text{вх}}^0 = U_{\text{вых}}^0 = U^0$ , В
10. Уровень напряжения  $U_{\text{вх}}^1 = U_{\text{вых}}^1 = U^1$ , В
11. Частота повторения входных сигналов  $f_{\text{п}}$ , МГц
12. Граничная частота усиления транзисторов  $T_1 - T_4 f_{\text{гр}}$ , МГц

13. Время перехода из состояния «0» в состояние «1»  $t_{\text{вх}}^{0,1}$ , нс

14. Время перехода из состояния «1» в состояние «0»  $t_{\text{вх}}^{1,0}$ , нс

15. Температура окружающей среды  $T^0$ , С

Преобразователь уровней должен обеспечивать управление исполнительным устройством, срабатывающим от напряжения  $U_{\text{иу}} =$  и имеющим входное сопротивление  $R_{\text{вх иу}} =$

### 3. Содержание пояснительной записки:

Введение

1. Назначение элементов и принцип работы

2. Расчет статических характеристик

3. Расчет динамических параметров

4. Расчет преобразователя уровней логического сигнала

Заключение

Список использованных источников

### 4. Перечень графического материала:

1. Схема электрическая принципиальная логического элемента

2. Схема электрическая принципиальная преобразователя уровней логического сигнала

3. Входная характеристика

4. Передаточная характеристика

5. Выходная характеристика

6. Эпюры переходного процесса

### 5. Основная литература:

1. Левашов Ю.А. Расчет электронных устройств: Учебное пособие. – Владивосток: Изд-во ВГУЭС, 2002.

2. Преснухин Л.Н., Воробьев Н.В., Шинкевич А.А. Расчет элементов цифровых устройств. – М.: Высш. шк., 1991.

3. Соломатин Н.М. Логические элементы ЭВМ. – М.: Высш. шк., 1987.

4. Завадский В.А. Компьютерная электроника. – Киев: ВЕК, 1996.

Руководитель работы: \_\_\_\_\_

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_  
(дата и подпись студента)

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

### Образец титульного листа

Министерство образования Российской Федерации

Владивостокский государственный университет  
экономики и сервиса

Кафедра электроники

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой электроники

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 200\_ г.

**Курсовая работа**  
**по дисциплине «Расчет электронных устройств»**

**РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТА ТТЛ**  
**И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УРОВНЕЙ**  
**ЛОГИЧЕСКОГО СИГНАЛА**

Выполнил:  
студент группы \_\_\_\_\_

Проверил:  
\_\_\_\_\_

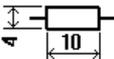
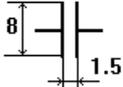
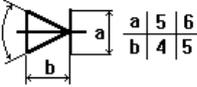
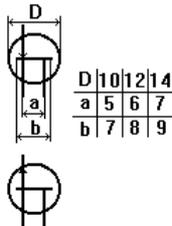
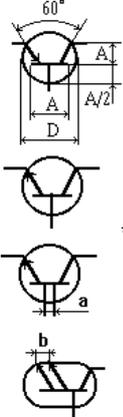
Владивосток

200\_

69

## ПРИЛОЖЕНИЕ 3

### Условные графические обозначения элементов схем

Обозначения	Наименования	ГОСТ												
	Резистор постоянный	2.728-74												
	Конденсатор постоянной емкости	2.728-74												
 <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>a</td><td>5</td><td>6</td></tr> <tr><td>b</td><td>4</td><td>5</td></tr> </table>	a	5	6	b	4	5	Диод полупроводниковый, общее обозначение	2.730-73						
a	5	6												
b	4	5												
 <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>D</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td></tr> <tr><td>a</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td></tr> <tr><td>b</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td></tr> </table>	D	10	12	14	a	5	6	7	b	7	8	9	Полевой транзистор с каналом n-типа  Полевой транзистор с каналом p-типа	
D	10	12	14											
a	5	6	7											
b	7	8	9											
 <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"> <tr><td>D</td><td>12</td><td>14</td></tr> <tr><td>A*</td><td>9</td><td>11</td></tr> <tr><td>a</td><td>2.5</td><td>3.5</td></tr> <tr><td>b</td><td>3</td><td>4</td></tr> </table> <p>*A = 3/4 D</p>	D	12	14	A*	9	11	a	2.5	3.5	b	3	4	Транзистор p-n-p-типа  Транзистор n-p-n-типа с коллектором, электрически соединенным с корпусом  Транзистор p-n-p-типа с двумя базовыми выводами  Двухэмиттерный транзистор n-p-n-типа	2.730-73
D	12	14												
A*	9	11												
a	2.5	3.5												
b	3	4												

Для транзисторов, являющихся элементами интегральных схем, окружность вокруг транзистора рисовать не обязательно.

# СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	3
1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	4
1.1. Цели и задачи курсового проектирования .....	4
1.2. Задание на курсовую работу .....	4
1.3. Указания к выполнению пояснительной записки и графических материалов .....	5
1.4. Выполнение курсовой работы и ее защита .....	8
2. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТА ТТЛ.....	9
2.1. Назначение элементов и принцип работы базовой схемы транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ)....	9
2.2. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТА ТТЛ.....	15
2.3. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТА ТТЛ.....	24
3. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТА ЭСЛ .....	30
3.1. Назначение элементов и принцип работы базовой схемы эмиттерно-связанной логики (ЭСЛ).....	30
3.2. МЕТОДИКА И ПРИМЕР РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТА ЭСЛ.....	36
3.3. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТА ЭСЛ .....	49
4. РАСЧЕТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УРОВНЕЙ ЛОГИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ .....	53
4.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ УРОВНЕЙ.....	53
4.2. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ ОТ ЭЛЕМЕНТА ТТЛ-ТИПА .....	54
4.3. СХЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ УСТРОЙСТВОМ ОТ ЭЛЕМЕНТА ЭСЛ-ТИПА .....	58
4.4. СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УРОВНЕЙ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В УРОВНИ ЭЛЕМЕНТОВ ТТЛ-ТИПА.....	60
4.5. СХЕМА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ УРОВНЕЙ УПРАВЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В УРОВНИ ЭЛЕМЕНТОВ ЭСЛ-ТИПА .....	63
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	66
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 ОБРАЗЕЦ ЗАДАНИЯ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ .....	67
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 ОБРАЗЕЦ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА .....	69
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМ .....	70

Учебное издание

**Левашов Юрий Александрович**  
**РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Учебно-методическое пособие

Редактор Л.И. Александрова  
Компьютерная верстка С.Ю. Заворотной

Лицензия на издательскую деятельность ИД № 03816 от 22.01.2001

Подписано в печать 28.02.2003. Формат 60×84/16.  
Бумага типографская. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,18.  
Уч.-изд. л. 3,8. Тираж 115 экз. Заказ

---

Издательство Владивостокского государственного университета  
экономики и сервиса

690600, Владивосток, ул. Гоголя, 41  
Отпечатано в типографии ВГУЭС  
690600, Владивосток, ул. Державина, 57

