

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ  
(ТУСУР)

Кафедра телевидения и управления (ТУ)

В.А. Шалимов, А.М. Заболоцкий

**ИССЛЕДОВАНИЕ БАЗОВОГО ЭЛЕМЕНТА  
ТРАНЗИСТОРНО-ТРАНЗИСТОРНОЙ ЛОГИКИ**

Руководство к лабораторной работе

Томск 2023

Шалимов В.А., Заболоцкий А.М. Исследование базового элемента транзисторно-транзисторной логики: руководство к лабораторной работе. Учебно-методическое пособие. – Томск: кафедра ТУ, ТУСУР, 2023. – 17 с.

Одобрено на заседании каф. ТУ протокол 3 от 15.02.2023

© Шалимов В.А., Заболоцкий А.М., 2023

© Кафедра Телевидения и управления, ТУСУР, 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. Основные характеристики и параметры логических элементов.....	4
2. Описание лабораторного макета.....	13
3. Порядок выполнения работы.....	14
Список литературы.....	17

## Введение

Настоящее руководство содержит описание лабораторной работы «Исследование базового элемента транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ)». Цифровые интегральные микросхемы (ИС) представляют собой электронные устройства, позволяющие строить практически все узлы и блоки ЦЭВМ, в которых обрабатываемая информация представлена в виде двоичных чисел. Переменные величины и функции от них, которые могут принимать только два значения 0 и 1, называются соответственно логическими переменными и логическими функциями. Свойства логических функций изучает Булева алгебра, а устройства, реализующие логические функции, называются логическими или цифровыми.

Логические элементы (ЛЭ) составляют основу цифровых устройств и основными являются элементы, реализующие логические функции НЕ, ИЛИ, И. В Булевой алгебре доказано, что любые логические операции могут быть выполнены с помощью ЛЭ только одного типа ИЛИ-НЕ или И-НЕ. Следовательно, любое цифровое устройство может быть построено из ЛЭ одного типа, однако на практике не ограничиваются одним типом ЛЭ. Отечественная промышленность выпускает несколько типов ЛЭ, объединенных в отдельные серии. Каждая серия представляет собой набор логических ИС, выполненных на одной конструкторско-технологической основе, но отличающихся реализуемой логической функцией.

В каждой серии ИС имеется так называемый базовый элемент, выполняющий основную логическую операцию, и ряд дополнительных, которые обеспечивают логическую полноту серии и позволяют более рационально проектировать изделие. Так как дополнительные элементы играют вспомогательную роль, для анализа работы определенной серии достаточно рассмотреть лишь базовый элемент.

### 1. Основные характеристики и параметры логических элементов (ЛЭ)

Основной статической характеристикой ЛЭ является передаточная характеристика - зависимость выходного напряжения  $U_{вых}$  от напряжения на одном из входов при постоянном напряжении других, равных  $U_{ex}^0$  или  $U_{ex}^1$  в зависимости от типа элемента. Передаточная характеристика инвертирующего ЛЭ представлена на рис. 1.1

Она имеет три четко выраженных участка. Участок 1 соответствует состоянию  $U_{вых} = U_{вых}^0$ , участок 2 – состоянию  $U_{вых} = U_{вых}^1$ . Кроме того, имеется промежуточный участок 3, на котором состояние ЛЭ не определено. Границы участков определяются точками А и В единичного усиления, в которых  $dU_{вых}/dU_{ex} = 1$ . Входные напряжения, определяющие границы участков, называют порогами переключения  $U_{пор}^0$  и  $U_{пор}^1$ .

Разность напряжений логической 1 и логического 0 называют логическим перепадом  $U_{лог} = U_{вых}^1 - U_{вых}^0$ . В тех случаях, когда область переключения не очень широкая, т.е.  $U_{пор}^1 - U_{пор}^0 \ll U_{лог}$ , пользуются понятием среднего порога переключения  $U_{пор ср} = (U_{пор}^0 + U_{пор}^1)/2$ .

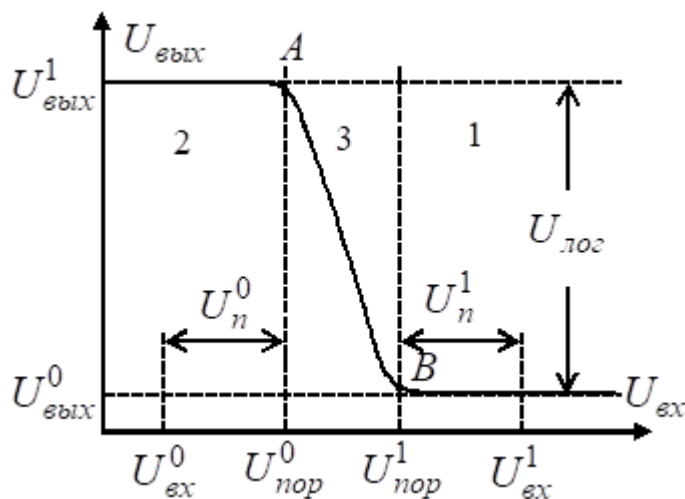


Рис. 1.1 – Передаточная характеристика инвертирующего ЛЭ

Помимо логических сигналов на входах могут появляться напряжения помехи, которые либо повышают, либо понижают входное напряжение. Если на входе действует напряжение  $U_{вх}^0$ , то опасны помехи, имеющие положительную полярность, т.к. при достаточно большом напряжении помехи рабочая точка на передаточной характеристике может сместиться в область переключения 3, что приведет к сбою в работе, т.е. ложному изменению выходных напряжений в цифровом устройстве. При поступлении на вход напряжения  $U_{вх}^1$  и напряжения помехи отрицательной полярности также возможно ложное срабатывание. Из рис. 1.1 видно, что максимально допустимые напряжения помехи положительной полярности  $U_n^0$  при  $U_{вх макс}^0$  на входе  $U_n^0 = U_{пор}^0 - U_{вх макс}^0$  и отрицательной полярности  $U_n^1$  при  $U_{вх мин}^1$  на входе  $U_n^1 = U_{вх мин}^1 - U_{пор}^1$  соответственно. Для оценки помехоустойчивости ЛЭ помимо напряжений  $U_n^0$  и  $U_n^1$  используют относительные величины  $K_n^0 = U_n^0 / U_{лог}$  и  $K_n^1 = U_n^1 / U_{лог}$ , называемые коэффициентами помехоустойчивости.

Входная характеристика – это зависимость входного тока  $I_{вх}$  от напряжения на данном входе при постоянных напряжениях на остальных входах. Для ЛЭ на биполярных транзисторах по этой характеристике определяют входные токи для двух состояний: ток низкого уровня  $I_{вх}^0 \geq 0$  при  $U_{вх} = U_{вх}^0$ , вытекающий из данного входа, и ток высокого уровня  $I_{вх}^1 \leq 0$  при  $U_{вх} = U_{вх}^1$ , втекающий в этот вход

Выходная характеристика – это зависимость выходного напряжения  $U_{вых}$  от выходного тока  $I_{вых}$  при постоянных напряжениях на входах. В общем случае таких

характеристик может быть две: для напряжения низкого уровня на выходе  $U^0_{\text{вых}} = f(I^0_{\text{вых}})$  и для напряжения высокого уровня на выходе  $U^1_{\text{вых}} = f(I^1_{\text{вых}})$ , где  $I^0_{\text{вых}}$  – выходной ток низкого уровня, втекающий в ЛЭ, и  $I^1_{\text{вых}}$  – выходной ток высокого уровня, вытекающий из ЛЭ.

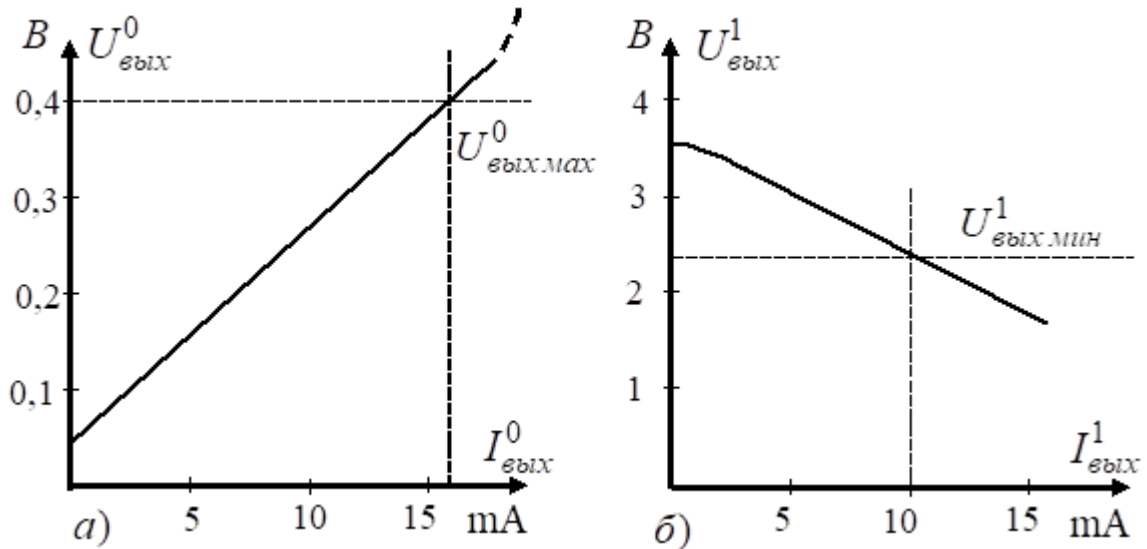


Рис. 1.2 – Выходные характеристики ЛЭ ТТЛ (а) – для сигналов низкого уровня; (б) – высокого уровня

Коэффициент разветвления по выходу  $n$  (нагрузочная способность) характеризует максимальное число входов логических элементов, аналогичных рассматриваемому, которые можно подключить к выходу. Данное увеличение нагрузочной способности ограничено, поскольку с ростом числа нагрузок ухудшаются другие основные параметры ЛЭ, главным образом помехоустойчивость и быстродействие. Так помехоустойчивость ЛЭ на биполярных транзисторах уменьшается с ростом числа нагрузок, так как увеличиваются выходные токи в обоих состояниях, а это приводит к снижению уровня  $U^1_{\text{вых}}$  и повышению уровня  $U^0_{\text{вых}}$ . Среднее время задержки сигнала возрастает вследствие увеличения емкости нагрузки. По этой причине в состав одной серии микросхем вводят ЛЭ с различной нагрузочной способностью:  $n = 4 \div 25$ . Коэффициент объединения по входу  $m$  равен числу входов ЛЭ. Обычно  $m = 2 \div 8$ .

Мощность, потребляемая ЛЭ от источника питания, зависит от его логического состояния, т.к. изменяется ток  $I_{\text{ин}}$  в цепи питания. ЛЭ потребляет ток  $I^0_{\text{ин}}$  при  $U_{\text{вых}} = U^0_{\text{вых}}$  и ток  $I^1_{\text{ин}}$  – при  $U_{\text{вых}} = U^1_{\text{вых}}$ , поэтому средняя потребляемая в статическом режиме мощность равна  $P_{\text{cp}} = 0,5E(I^0_{\text{ин}} + I^1_{\text{ин}})$ . Зная среднюю мощность, потребляемую одним элементом, и число ЛЭ  $N$  в цифровом устройстве, можно вычислить среднюю мощность  $P = P_{\text{cp}} \cdot N$ , потребляемую всем устройством.

Мощность, потребляемую ЛЭ дополнительно в процессе переключения, называют динамической. Она пропорциональна частоте переключения ЛЭ, поэтому динамическую мощность определяют при заданной частоте переключения, близкой к максимальной. В основном динамическая мощность связана с затратами энергии на заряд паразитных емкостей.

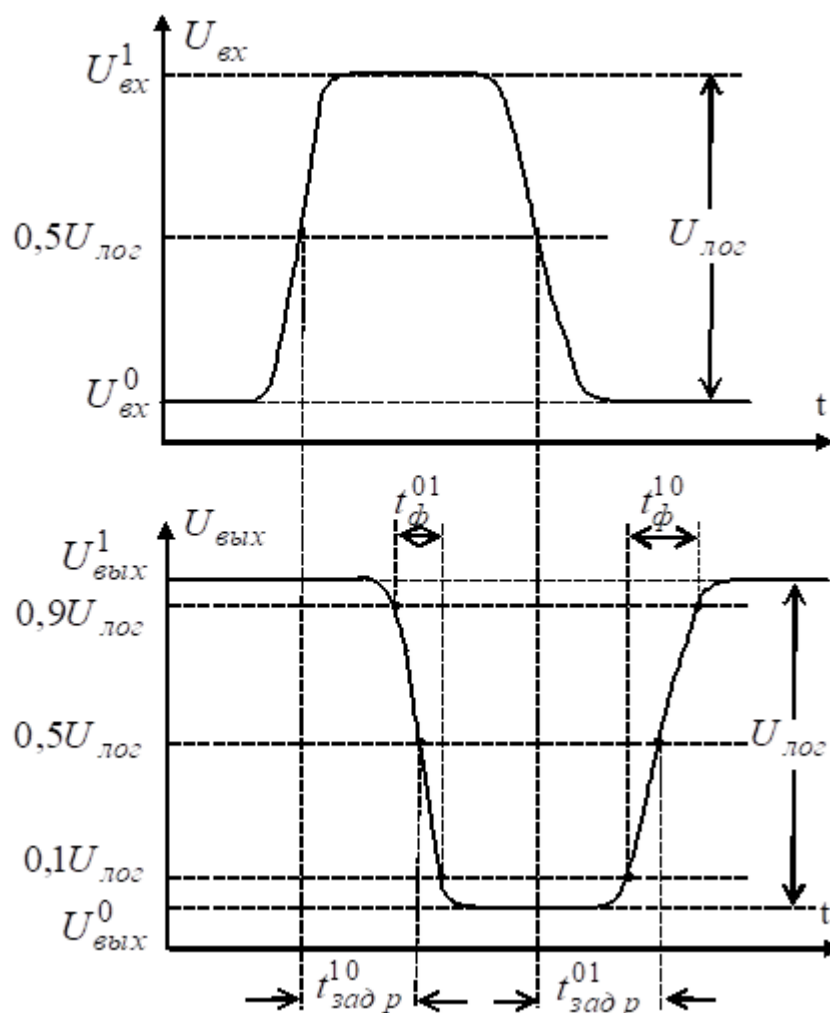


Рис. 1.3 – Временные диаграммы напряжений на входе и выходе логического элемента

Быстродействие ЛЭ оценивается средним временем задержки распространения сигнала

$$t_{\text{зад п ср}} = \frac{(t_{\text{зад п}}^{01} + t_{\text{зад п}}^{10})}{2}$$

где  $t_{\text{зад п}}^{01}$  и  $t_{\text{зад п}}^{10}$  – времена задержки распространения сигнала при переходе напряжения на выходе от значения  $U_{\text{вых}}^0$  к  $U_{\text{вых}}^1$  и от  $U_{\text{вых}}^1$  к  $U_{\text{вых}}^0$  соответственно, измеряемые на уровне  $0,5 U_{\text{лог}}$  (см. рис. 1.3).

Представляют интерес длительности фронтов импульсов  $t_{\phi}^{01}$  и  $t_{\phi}^{10}$ , измеряемые между уровнями 0,1 и 0,9 от амплитуды, при переходе напряжения на выходе от  $U_{вых}^0$  к  $U_{вых}^1$  и от  $U_{вых}^1$  к  $U_{вых}^0$  соответственно.

Для измерения среднего времени задержки распространения сигнала  $t_{зад\ p\ ср}$  часто используют кольцевой генератор, представляющий замкнутую в кольцо цепочку нечетного числа  $K$  инвертирующих ЛЭ. Схема генератора представлена на рис. 1.4 В таком генераторе возбуждаются колебания с периодом  $T_{Г} = 2K \cdot t_{зад\ p\ ср}$ .

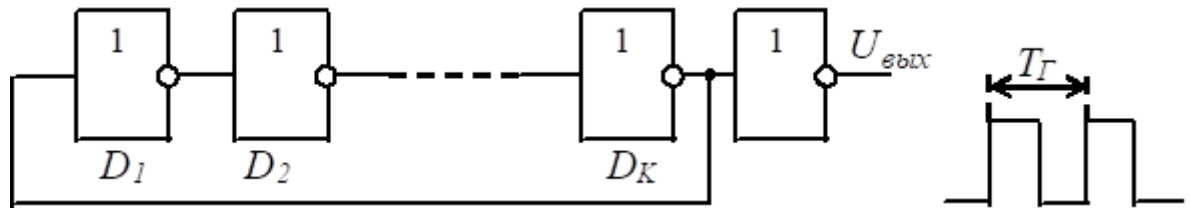


Рис. 1.4 – Кольцевой генератор на ЛЭ

При единичной нагрузке каждого инвертора и большом количестве инверторов  $K$ , а также при подключении измерительного прибора через развязывающий инвертор, удается определить минимальное значение  $t_{зад\ p\ ср}$  для оценки предельного быстродействия ЛЭ.

Для сравнения ЛЭ различных типов используют параметр, называемый работой переключения  $A_{пер} = P_{ср} \cdot t_{зад\ p\ ср}$ . Чем выше качество схемотехнической и конструкторско-технологической реализации ЛЭ, тем меньше работа переключения. Для большинства семейств цифровых микросхем работа переключения находится в пределах  $0,1 \div 500$  пДж.

Базовым логическим элементом ИС ТТЛ-типа является элемент И-НЕ, реализующий операцию логического умножения (конъюнкции) с отрицанием, называемый иногда элементом Шеффера. Он представляет собой схему, сигнал «1» на выходе которой имеет место всегда кроме случая, когда сигналы "1" присутствуют на всех входах.

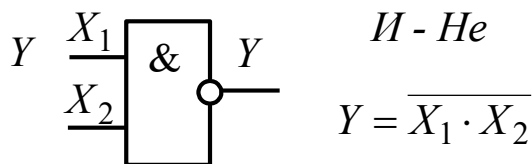


Рис. 2.5 – Обозначение логического элемента И-НЕ

На рис. 1.5. показано условное графическое обозначение элемента Н – НЕ.



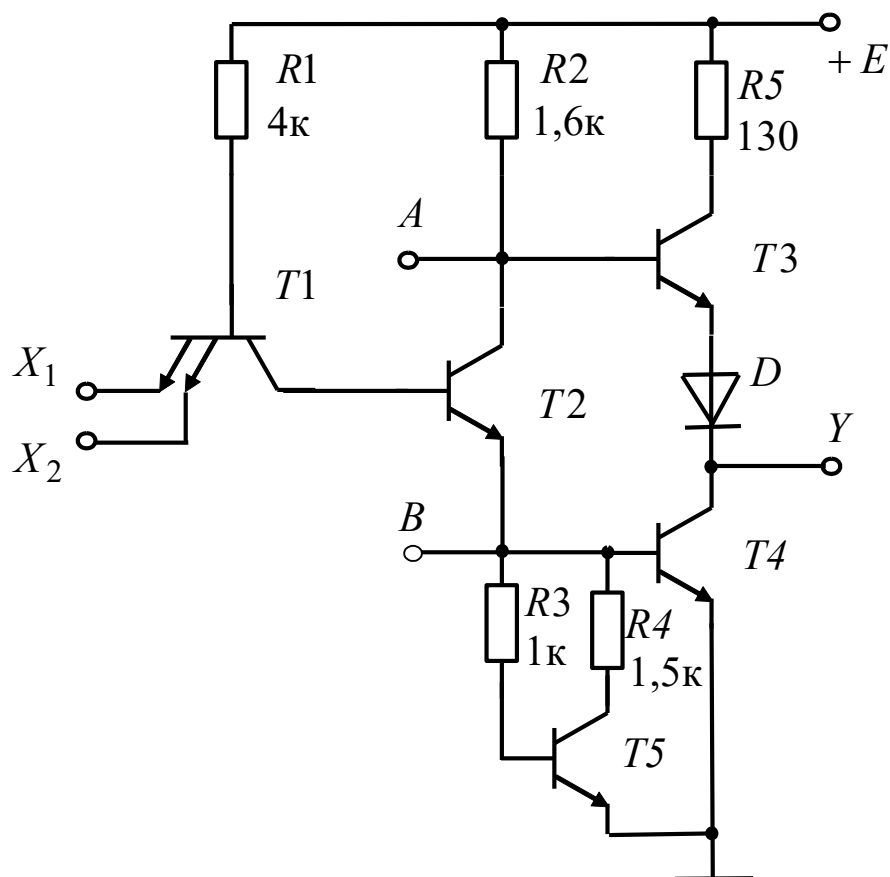


Рис. 1.6 – Схема базового ЛЭ ТТЛ серии К155

Схема ЛЭ ТТЛ «И-НЕ» состоит из двух частей (рис. 1.6) входной, реализующей функцию И, и состоящей из резистора  $R1$  и переходов база – эмиттер многоэмиттерного транзистора  $T1$ , и выходной, реализующей функцию НЕ и представляющей собой сложный инвертор. Инвертор состоит из фазорасщепительного каскада (резистор  $R2$ , транзистор  $T2$ , а также узел  $T5$ ,  $R3$ ,  $R4$ ) и выходного усилителя (транзисторы  $T3$ ,  $T4$  и диод  $D$ ). Элементы  $T3$ ,  $D$ , образуют эмиттерный повторитель, обеспечивающий передачу сигнала на выход  $V$ . В зависимости от выходного тока транзистор  $T3$  может работать как в активном режиме, так и в режиме насыщения. Резистор  $R5$  предохраняет транзистор  $T3$  и диод  $D$  от перегрузки при случайном замыкании выхода ЛЭ на землю, а также он ограничивает сквозной ток через транзисторы  $T3$  и  $T4$  при переключении ЛЭ. Узел  $T5$ ,  $R3$ ,  $R4$  служит для улучшения передаточной характеристики и повышения помехоустойчивости. При первом рассмотрении этот узел может быть представлен как резистор 1 кОм.

## 2. Описание лабораторного макета

Лицевая панель лабораторного макета изображена на рис. 2.1. На лицевой панели нанесены исследуемые схемы ЛЭ И-НЕ ТТЛ и КМДП типов, с выводами контрольных точек по входу, выходу, напряжению источника питания. В ЛЭ введены измерительные

резисторы  $R_{изм}$ , для оценки величины тока, протекающего через ЛЭ. Измерительные резисторы включаются выключателем SA6.1(2). Переключателем SA2 осуществляется выбор логического элемента, а также устанавливается напряжение питания  $E_{шт}$  5 или 10 В для ЛЭ КМДП типа. Переключателем SA3 «Вид сигнала» – на вход ЛЭ подаются следующие сигналы:

- 1) пилообразные импульсы, необходимые для наблюдения передаточной характеристики (положение 1)
- 2) короткие прямоугольные импульсы для удобства измерения времени задержки и фронтов импульсов (положение 2)
- 3) прямоугольные импульсы со скважностью  $Q=2$  разной частоты (положения переключателя 3,4,5).

При этом на гнездо «СИ» подаются синхроимпульсы, необходимые для синхронизации осциллографа.

В качестве задающего генератора формирователя импульсов используется кольцевой генератор представляющий замкнутую в кольцо цепочку из семи инверторов на ЛЭ И - Не 561ЛА7 (см. рис. 1.4 – Кольцевой генератор на ЛЭ). Напряжение с выхода генератора выводится на гнездо  $U_{вх}$ .

Ток, потребляемый исследуемым ЛЭ, можно измерить с помощью миллиамперметра, чувствительность которого устанавливается переключателем SA1.

Внимание !. Включайте миллиамперметр только по мере необходимости, начиная с минимальной чувствительности (10 мА).

Переключатель SA 4 « $R_H$ » позволяет подключать к выходу ЛЭ требуемое сопротивление нагрузки  $R_{H2}$  относительно источника питания  $E_{шт}$  (положения 5, 6, 7), либо  $R_{H1}$  относительно общей точки (положения 2, 3, 4).

С помощью переключателя SA5 « $C_H$ » к выходу ЛЭ можно подключать различные емкости нагрузки.

Значения параметров переключаемых элементов макета приведены в таблице 3.1 приложения.

Таблица 3.1

Положение переключателей	$R_H$ , Ом		$C_H$ , пФ
	ТТЛ	КМДП	
1	$\infty$	$\infty$	0
2	2400	4700	50
3	1000	2000	100
4	360	680	150

5	360	680	—
6	1000	2000	—
7	2400	4700	—
8	$\infty$	$\infty$	—

$R_{изм\ TTI} = 10\ \text{OM}$

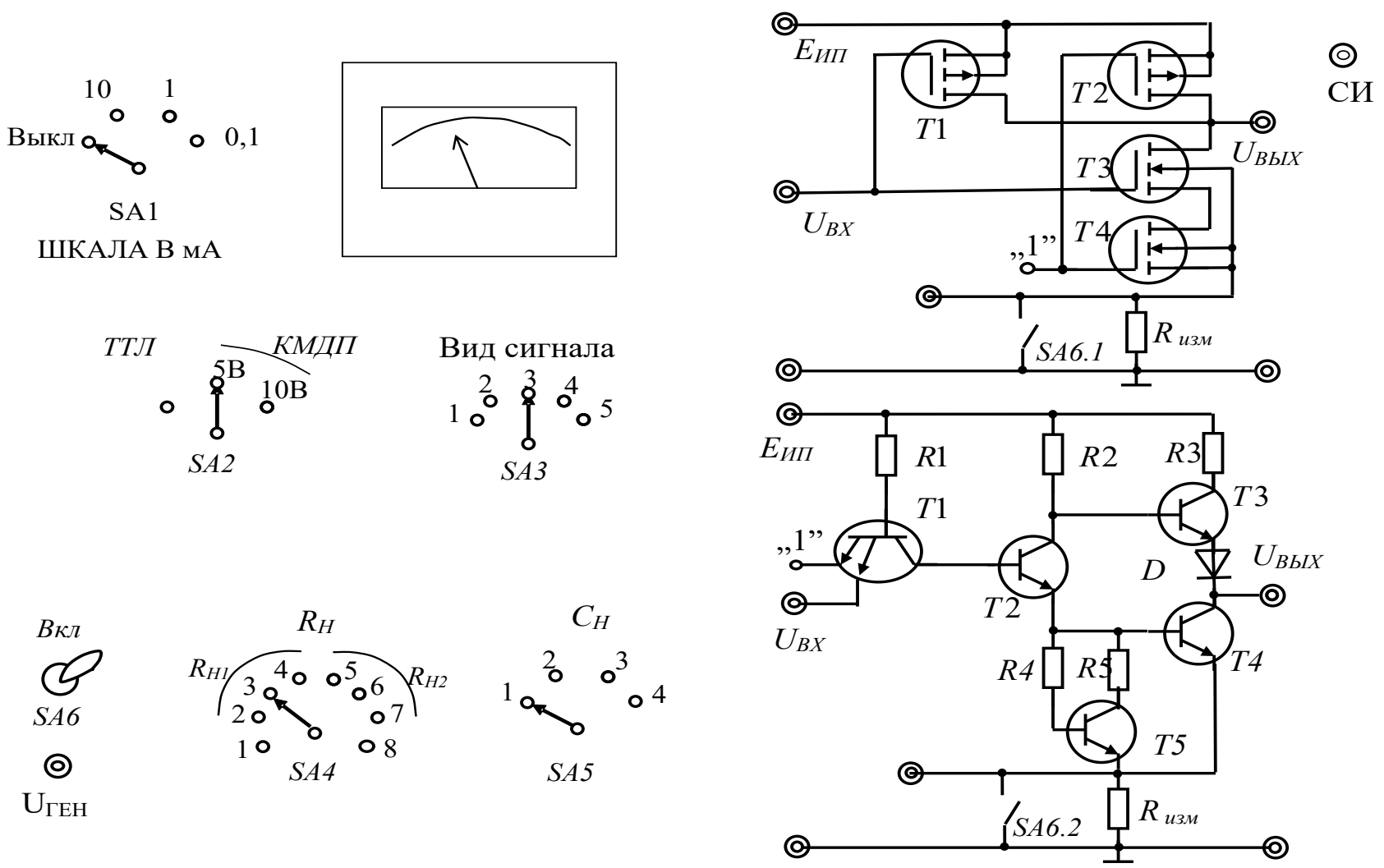


Рис. 2.1 – Лицевая панель макета для исследования логических элементов И-НЕ ТТЛ и КМДП типа

### 3. Описание лабораторной работы. "Исследование базового элемента транзисторно-транзисторной логики (ТТЛ)"

#### 3.1. Цель работы

Целью работы является:

- 1) ознакомление с принципиальной схемой, логикой работы и изучение принципа действия базового логического элемента И-НЕ ТТЛ логики;
- 2) освоение методики экспериментального определения основных характеристик и параметров ЛЭ ТТЛ-типа и их зависимости от условий работы.

#### 3.2. Краткие сведения из теории

Базовым логическим элементом ИС ТТЛ - типа является элемент И-НЕ, реализующий операцию логического умножения (конъюнкции) с отрицанием, называемый иногда элементом Шеффера. Он представляет собой схему, сигнал "1" на выходе которой имеет место всегда кроме случая, когда сигналы "1" присутствуют на всех входах.

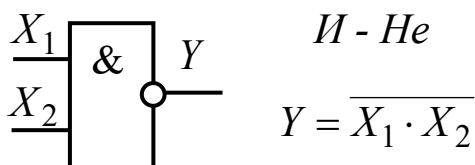


Рис. 3.1 Обозначение логического элемента И - НЕ.

На рис. 3.1 показано условное графическое обозначение элемента И-НЕ.

Схема ЛЭ состоит из двух частей: входной, реализующей функцию И, и состоящей из резистора R1 и переходов база-эмиттер многоэмиттерного транзистора T1, и

выходной, реализующей функцию НЕ и представляющей собой сложный инвертор. Инвертор состоит из фазорасщепительного каскада (резистор R2, транзистор T2, а также узел T5, R3, R4) и выходного усилителя (транзисторы T3, T4 и диод D). Элементы T3, D, T4 образуют эмиттерный повторитель, обеспечивающий передачу сигнала. В зависимости от выходного тока транзистор T3 может работать как в активном режиме, так и в режиме насыщения. Резистор R5 предохраняет транзистор T3 и диод D от перегрузки при случайном замыкании выхода ЛЭ на землю, а также он ограничивает сквозной ток через транзисторы T3 и T4 при переключении ЛЭ. Узел T5, R3, R4 служит для улучшения передаточной характеристики и повышения помехоустойчивости. При первом рассмотрении этот узел может быть представлен как резистор 1 кОм.

### 3.3. Порядок выполнения работы

1. Снять передаточную характеристику ЛЭ И-НЕ ТТЛ -типа 155ЛА2.

Для этого необходимо подключить входы осциллографа к входу и выходу ЛЭ ТТЛ - типа, а вход синхронизации осциллографа к гнезду «СИ» (синхроимпульсы); установить одинаковую чувствительность по обоим входам, совместить нули по обоим входам на одном уровне в нижней части экрана осциллографа.

Переключателем SA2 включите ЛЭ ТТЛ типа и подайте на его вход переключателем "Вид сигнала" SA3 пилообразное напряжение, поставив его в положение 1. Переключатели SA1, SA4, SA5 поставьте в положение 1 и тумблер SA6 в положение выключено. В этом случае на вход ЛЭ подается пилообразное напряжение, а на выходе ЛЭ формируется передаточная характеристика (см. рис. 3.2).

Зарисуйте осциллограммы сигналов на входе и выходе ЛЭ.

По форме передаточной характеристики определите  $U_{вых}^0$ ,  $U_{вых}^1$ ,  $U_{пор}^0$  и  $U_{пор}^1$ .

Вычислите логический перепад  $U_{лог} = U_{вых}^1 - U_{вых}^0$ .

Рассчитайте максимально допустимые напряжения помехи

$$U_n^0 = U_{пор}^0 - U_{вх.мак}^0, \quad U_n^1 = U_{вх.мак}^1 - U_{пор}^1, \quad \text{здесь } U_{вх.мак}^0 \leq 0,4 \text{ В}, \quad U_{вх.мак}^1 \geq 2,4 \text{ В}$$

и коэффициенты помехоустойчивости

$$K_n^0 = U_n^0 / U_{лог} \quad \text{и} \quad K_n^1 = U_n^1 / U_{лог}$$

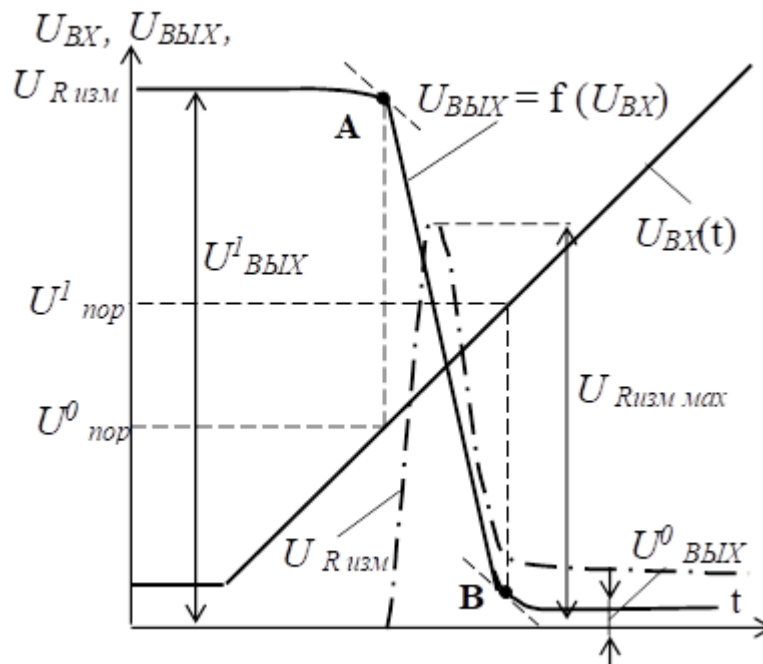


Рис. 3.2 – Временные диаграммы напряжений ТТЛ элемента

2. Переключив вход осциллографа со входа ЛЭ на резистор  $R_{изм}$  в общем проводе ЛЭ, поставьте тумблер SA6 в положение "Вкл".

Определите амплитуду сквозного тока, протекающего через ЛЭ во время переключения  $I_{скв.мак} = U_{мак} / R_{изм}$ .

3. Снять зависимости  $U^0_{вых} = f(R_{H2})$  и  $U^1_{вых} = f(R_{H1})$  и по ним построить выходные характеристики ЛЭ для напряжения низкого уровня на выходе  $U^0_{вых} = f(I^0_{вых})$  и для напряжения высокого уровня на выходе  $U^1_{вых} = f(I^1_{вых})$ ,

$$\text{где } I^0_{вых} = \frac{E_{ИП} - U^0_{вых}}{R_{H2}}; \quad I^1_{вых} = \frac{U^1_{вых}}{R_{H1}}$$

Результаты эксперимента сведите в таблицы 3.1 и 3.2

Таблица 3.1

Положение переключателя	5	6	7	8
$R_{H2}$ , Ом				
$U^0_{вых}$ , В				
$I^0_{вых}$ , А				

Таблица 3.2

Положение переключателя	1	2	3	4
$R_{H1}$ , Ом				
$U^1_{вых}$ , В				
$I^1_{вых}$ , А				

По данным таблиц постройте выходные характеристики ЛЭ.

4. Снять зависимость потребляемого от источника питания тока от частоты входного сигнала  $I_{ИП ср} = f(f_c)$  при  $C_n = 0$  и  $C_{n max}$ ,  $R_n = \infty$ .

Построить зависимость мощности, потребляемой от источника питания, от частоты входного сигнала  $P_{ср} = I_{ИП ср} \cdot E_{ИП} = f(f_c)$  при  $C_n = 0$  и  $C_{n max}$ ,  $R_n = \infty$ .

На вход ЛЭ подаются симметричные прямоугольные импульсы, частота которых меняется переключателем "Вид сигнала" SA3 (положения 3, 4, 5) Измерение частоты сигнала осуществляется осциллографом на входе или выходе ЛЭ. Потребляемый от источника питания ток измеряется миллиамперметром, встроенным в макет. Требуемая чувствительность прибора устанавливается переключателем SA1. Емкость нагрузки  $C_n$  задаётся переключателем SA5.

Результаты эксперимента и расчетные данные сведите в таблицу 3.3.

Таблица 3.3

Положение переключателя	3	4	5
$T_c$ , мкс			
$f_c$ , кГц			
$I_{III}$ , мА			
$P_{cp}$ , мВт			

5. Снять зависимости  $t_{зад\ p}^{01} = f(C_n)$ ,  $t_{зад\ p}^{10} = f(C_n)$

$t_{\phi}^{01} = f(C_n)$ ,  $t_{\phi}^{10} = f(C_n)$ , при  $R_n = \infty$ .

На вход логического элемента подайте короткие прямоугольные импульсы с аналогичного ЛЭ, поставив переключатель "Вид сигнала" SA3 в положение 5. Входы осциллографа подключите к входу и выходу ЛЭ, произведите измерение указанных выше величин, изменяя емкость нагрузки ЛЭ переключателем SA5.

Данные измерений сведите в таблицу 3.4

Таблица 3.4

Положение переключателя	1	2	3	4
$C_n$ , пФ				
$t_{зад\ p}^{01}$ , нс				
$t_{зад\ p}^{10}$ , нс				
$t_{\phi}^{01}$ , нс				
$t_{\phi}^{10}$ , нс				

6. Оформите отчет по лабораторной работе. Он должен содержать принципиальную схему, выполнение пунктов программы, выводы по каждому пункту экспериментальных исследований.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
2. Электроника. Часть 1: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 209 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7278> (дата доступа:08.05.2023)
3. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
4. Электроника: Учебное пособие / Коновалов В. Ф. - 2012. 266 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7314> (дата доступа:08.05.2023)
5. Электроника. Часть 2: Учебное пособие / Ицкович В. М., Шалимов В. А. - 2016. 120 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/7279> (дата доступа:08.05.2023)
6. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2001.- 488 с.
7. Учебное пособие «Микроэлектроника» : Для направления подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника». Профиль: «Промышленная электроника» / Легостаев Н.С. - 2013. 172 с.: Научно-образовательный портал ТУСУР, <https://edu.tusur.ru/publications/4280> (дата доступа:08.05.2023)
8. Гусев В.Г. Электроника: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 622 с. (73): Библиотека ТУСУР.